



**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA CONSTRUCCIÓN DE  
VÍAS CON ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS DE  
CORASFALTOS, EN EL TRAMO CAMILO C –FREDONIA, K9+400,  
DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

**XIMENA LÓPEZ GIRALDO  
PABLO FELIPE PRADA MORIONES**

**UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERIA CIVIL  
PEREIRA  
2010**



**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA CONSTRUCCIÓN DE  
VÍAS CON ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS DE  
CORASFALTOS, EN EL TRAMO FREDONIA – CAMILO C,  
DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

**XIMENA LÓPEZ GIRALDO  
PABLO FELIPE PRADA MORIONES**

**Proyecto del trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Asesor:  
ING. GLORIA MOLINA**

**UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERIA CIVIL  
PEREIRA  
2010**

## **TABLA DE CONTENIDO**

	Pag.
<b>1. TÍTULO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. DESCRIPCION DEL AREA PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>3. INTERROGANTES .....</b>	<b>14</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>5. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Objetivo General</b>	
<b>5.2 Objetivos Específicos</b>	
<b>6. HIPÓTESIS .....</b>	<b>17</b>
<b>7. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>17</b>
<b>8. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>8.1 Fundamentación de la metodología</b>	
<b>8.2 Procedimientos para la estabilización</b>	
<b>8.2.1 Análisis Granulométrico de suelos por tamizado</b>	
<b>8.2.2 Determinación del Límite Líquido, plástico e índice de plasticidad de suelos</b>	
<b>8.2.3 Análisis por Difracción de Rayos X</b>	
<b>8.2.4 Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos</b>	
<b>8.2.5 Relación de soporte del suelo en Laboratorio</b>	
<b>8.2.6 Capacidad de Intercambio Catiónico</b>	
<b>8.2.7 Aluminio intercambiable o extractable</b>	
<b>8.2.8 Contenido de carbonatos</b>	
<b>8.2.9 Contenido de materia orgánica fácilmente oxidable</b>	
<b>8.2.10 Contenido de Cloruros</b>	
<b>8.2.11 Contenido de Sulfatos</b>	
<b>8.2.12 pH de saturación del suelo</b>	

<b>8.2.13</b>	Floculación – Aglomeración	
<b>8.2.14</b>	Reacción Puzolánica	
<b>8.2.15</b>	Reacción de Carbonatación	
<b>9.</b>	ANTECEDENTES .....	27
<b>9.1</b>	Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas	
<b>9.2</b>	Estabilización de subrasantes mediante el sistema arena – emulsión asfáltica	
<b>9.3</b>	Tratamientos de suelos con cal	
<b>9.4</b>	Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo	
<b>9.5</b>	Estudio para la utilización de cenizas provenientes de la caldera cogeneradora PetroPower en la estabilización de suelos	
<b>10.</b>	MARCO CONCEPTUAL .....	32
<b>10.1</b>	Tipos de suelos	
<b>10.1.1</b>	Granulares	
<b>10.1.1.1</b>	Suelos Arcillosos	
<b>10.1.1.2</b>	Suelos Limosos	
<b>10.1.1.3</b>	Suelos Arenosos	
<b>10.1.2</b>	Cohesivos	
<b>10.2</b>	Ensayos para la determinación de la capacidad de soporte de la subrasante	
<b>10.2.1</b>	Penetrómetro Dinámico de Cono	
<b>10.2.1.1</b>	Características técnicas	
<b>10.2.1.2</b>	Aplicaciones	
<b>10.2.2</b>	Deflectómetro de Impacto	
<b>10.2.2.1</b>	Características técnicas	
<b>10.2.2.1.1</b>	Deflectómetro de Impacto de 65 KN	
<b>10.2.2.1.2</b>	Deflectómetro de Impacto de 150 KN	
<b>10.2.2.2</b>	Aplicaciones	

<b>10.2.3</b> Viga Benkelman	
<b>10.2.3.1</b> Características técnicas	
<b>10.2.3.2</b> Aplicaciones	
<b>10.2.4</b> Ensayo de CBR	
<b>11.MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>40</b>
<b>11.1</b> Modelo del proceso metodológico	
<b>11.2</b> Proceso constructivo	
<b>11.2.1</b> Estado inicial del Terraplén	
<b>11.2.2</b> Nivelación	
<b>11.2.3</b> Sectorización	
<b>11.2.4</b> Escarificación del suelo natural	
<b>11.2.5</b> Aditivos Químicos	
<b>11.2.6</b> Aplicación del aditivo Sólido, Oxido de calcio (CaO)	
<b>11.2.7</b> Aplicación del aditivo Líquido, Silicato de Sodio (NaCl)	
<b>11.2.8</b> Colocación de agua de prehumectación	
<b>11.2.9</b> Mezclado del Suelo + Aditivos + Agua	
<b>11.2.10</b> Extensión y nivelación del suelo mezclado y homogenizado	
<b>11.2.11</b> Compactación de las capas	
<b>11.3</b> Factores tenidos en cuenta en el proceso constructivo	
<b>12.RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
<b>12.1</b> Resultados de la evaluación inicial de la subrasante	
<b>12.1.1</b> Fase 1: Suelo natural	
<b>12.1.1.1</b> Análisis físico a las muestras de suelo	
<b>12.1.1.2</b> Análisis químico del suelo	
<b>12.1.1.2.1</b> Caracterización química al suelo sin estabilizar	
<b>12.1.1.3</b> Análisis mecánico del suelo	
<b>12.1.1.3.1</b> Viga Benkelman	
<b>12.1.1.3.1</b> Penetración de Cono Dinámico	

<b>12.1.2 Fase 2: Suelo Aditivado en Laboratorio</b>	
<b>12.1.2.1 Relación de soporte del suelo estabilizado (CBR)</b>	
<b>12.1.2.2 Estudio de Transito y Diseño</b>	
<b>12.2 Resultados evaluación final de subrasante estabilizada después de la ejecución de los trabajos</b>	
<b>12.2.1 Viga Benkelman</b>	
<b>12.2.2 CBR Inalterados y calculados indirectamente con valores de PDC</b>	
<b>12.2.3 Límites de Atterberg</b>	
<b>12.2.4 Densidades de campo</b>	
<b>13. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ESTUDIOS</b>	
<b>INICIALES Y EVALUACIÓN FINAL .....</b>	<b>77</b>
<b>13.1 Deflexión característica del suelo original y aditivado</b>	
<b>13.2 CBR del suelo original y aditivado</b>	
<b>13.3 Análisis del índice de plasticidad del suelo original y aditivado (Límites de Atterberg)</b>	
<b>13.4 Módulos resilientes de suelo original y aditivado</b>	
<b>13.5 Comparación de diseños con CBR inicial (sin estabilizar) y CBR final (aditivado)</b>	
<b>13.6 Análisis de método constructivo – presupuestos – rendimientos de maquinaria y mano de obra</b>	
<b>13.7 Impactos que tiene la aplicación de esta tecnología</b>	
<b>13.7.1 Impacto Ambiental</b>	
<b>13.7.2 Impacto Social</b>	
<b>13.7.3 Impacto Económico</b>	
<b>14. CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>15. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>16. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
1. Valores de carga unitaria .....	39
2. Listado de ensayos realizados al suelo .....	43
3. Resumen de las propiedades preliminares de los suelos analizados ..	59
4. Porcentaje de material constituyente del suelo del terraplén .....	60
5. Resultados de análisis químico del suelo original .....	61
6. Resultados Viga Benkelman .....	62
7. Abscisas para realizar pruebas de PDC y muestreo .....	63
8. Valores de PDC Y CBR Correlacionado .....	63
9. Valores de Módulo Resiliente y CBR .....	64
10.Resultados de CBR al material G-207-09-01 .....	66
11.Cantidad de Aditivos .....	66
12.Calidad de los aditivos .....	67
13.Características ensayo de Proctor Modificado al suelo aditivado .....	67
14.Espesores de Capa .....	68
15.Resultados Viga Benkelman .....	71
16.Correlación Deflexiones características admisibles .....	72
17.Modulo de Resiliencia en suelo original y aditivado .....	73
18.CBR En suelo original y aditivado .....	74
19.CBR Aditivado 14 días y CBR Proyectado 28 días .....	74
20.Limites de Atterberg .....	75
21.Densidades de Campo .....	76
22.Relación entre deflexiones características de suelo original y aditivado	78
23.Módulos Resilientes del suelo Original y Aditivado .....	82
24.CBR de Diseño .....	83
25.Diseño de la estructura con suelo original y aditivado .....	83

<b>26.</b> Análisis de rendimiento de maquinaria y mano de obra .....	85
<b>27.</b> Análisis Ambiental del transporte de material .....	87
<b>28.</b> Comparativo de Presupuestos del método tradicional con la metodología	89



## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pag.
1. Ubicación del proyecto .....	17
2. Estado inicial del terraplén .....	47
3. Nivelación de la vía .....	48
4. Escarificación del suelo .....	49
5. Mezclado del suelo .....	49
6. Método de ajedrez .....	50
7. Distribución aditivo Solido .....	51
8. Riego aditivo Solido .....	51
9. Distribución aditivo Líquido .....	52
10.Colocación de agua de prehumectación .....	53
11.Mezcla de Suelo + Aditivo + Agua .....	53
12.Extensión de mezcla .....	54
13.Compactación del suelo Aditivado .....	55
14.Peachímetro .....	56
15.Mezcla con Arador agrícola .....	57

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pag.
1. Modelo de proceso metodológico .....	45
2. Comparativo de las deflexiones características del suelo .....	79
3. Comparativo de CBR en suelo original y aditivado .....	80
4. Comparativo de los módulos resilientes .....	82

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el país presenta un atraso muy alto en infraestructura vial, ya que son pocos los recursos destinados para construir vías secundarias y terciarias, las cuales representan un 80 % del inventario vial nacional.

Debido a que los presupuestos son tan reducidos y cada vez se hace más difícil optimizar los procesos constructivos en cuanto a costo, plazo y calidad, se hace necesaria la aplicación de nuevas tecnologías y metodologías constructivas que ayuden a optimizar estos factores sin que se pierda calidad en la ejecución de proyectos viales.

A raíz de esto se enfoca una evaluación en la cual se da la viabilidad de aplicar la tecnología de CORASFALTOS en la construcción de vías a bajo costo por medio de la Estabilización Química de suelos de Subrasante, con la participación de la Empresa OPQ Ingeniería, equipo y construcción Ltda., la cual tiene convenio con esta corporación investigadora, como ingenieros constructores de la metodología a nivel Nacional, y también contando con el apoyo de los estudiantes Pablo Prada y Ximena López de la Universidad Libre como auxiliares de la obra, en el tramo de vía CAMILO C. – FREDONIA sector El Tesoro, Departamento de Antioquia; evaluación que se llevo a cabo el día 21 de septiembre hasta el día 11 de octubre de 2009, en la que se identificó como los procesos de la estabilización química influyeron en la capacidad portante del suelo de subrasante, y el porque estos beneficios llevaron a definir que en las vías secundarias y terciarias, pueden ser reemplazadas sus estructuras granulares, para optimizar costos y rendimientos de obra.

Es por esto que se pretende dar a conocer este método constructivo como una de las mejores alternativas para construir vías con beneficios para el medio ambiente

y ahorros que oscilan entre el 20% y el 35% por Kilómetro de vía construida, comparado con el método tradicional de bases y subbases.

La idea principal fue aplicar la técnica desarrollada por CORASFALTOS, la cual está fundamentada en el análisis de las características físico – químicas y mecánicas de la subrasante en un tramo de vía de 200 ml en un terraplén compuesto por suelos tipo Arcillo limoso y limo arcilloso (CL-ML), con Índice de Plasticidad (IP) del 8% y un CBR promedio del 26%, el cual después de la estabilización tuvo buenos comportamientos físicos y mecánicos que hicieron de la aplicación un tramo de prueba exitoso.

En conclusión en este tramo de prueba, se pudo comprobar que la aplicación de nuevas tecnologías en el tema de construcción vial, traen beneficios que afectan directamente los costos y rendimientos de estas. El motivo que llevo a evaluar este sistema constructivo fue el poder demostrar con resultados los beneficios técnicos, económicos y ambientales que trae la estabilización química de suelos de la Corporación Investigadora CORASFALTOS a los problemas de infraestructura vial que presenta el país.

A continuación se verán en una primera etapa la descripción del problema, algunos interrogantes, justificación, los objetivos que se trazaron al inicio de esta investigación, los cuales fueron alcanzados y la delimitación de este proyecto; como segunda etapa se mostraran algunos conceptos que se deben tener en cuenta, los pasos que se siguieron a lo largo de la construcción de este tramo, y algunos antecedentes referentes con este tema; por ultimo se tendrá un análisis detallado de los resultados obtenidos, sus comparaciones y conclusiones de este proceso.

## **1. TÍTULO**

### **EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS CON ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS DE CORASFALTOS, EN EL TRAMO CAMILO C.- FREDONIA, SECTOR EL TESORO, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.**

## **2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMA**

Debido a los innumerables atrasos que tiene el país en materia de infraestructura vial, donde el inventario nacional de redes es de <sup>1</sup>160.000Km, y construidos solo se tiene un 15% correspondiente a 24000Km., en su mayoría redes primarias y secundarias, como también los altos costos que tiene la construcción de las mismas y a la problemática social que esto conlleva, se vio la necesidad de adoptar, estudiar y demostrar los impactos económicos, sociales, ambientales y técnicos que ejerce la aplicación de una nueva tecnología en construcción de vías secundarias y terciarias.

Para esta evaluación se implementó la tecnología de estabilización química de suelos de la Corporación para la investigación y desarrollo en asfaltos en el sector de transporte, CORASFALTOS.

Se realizó un tramo de prueba de 200ml en el sector CAMILO C. – FREDONIA sector El Tesoro, Departamento de Antioquia, ya que la Gobernación de este Departamento por la necesidad de construir vías y hacer rendir sus presupuestos, vieron esta tecnología como la opción mas fuerte para la construcción de estas, en zonas donde es difícil encontrar materiales granulares como bases y subbases. Por este motivo se adjudicó el tramo piloto antes mencionado, ya que este anteriormente presentaba una reptación lineal hacia la quebrada, por lo cual se

---

<sup>1</sup> [www.dnp.gov.co](http://www.dnp.gov.co) = Departamento Nacional de Planeación

desplazó el eje de la vía a un punto donde la falla no afectará la estructura del pavimento. En este sitio se construyó un terraplén con material de préstamo, el cual fue categorizado por los ensayos como suelo Arcillo limoso y limo arcilloso (CL-ML). Una vez caracterizado el suelo y modificado con los agentes químicos, este fue estabilizado. La empresa OPQ ingeniería, equipo y construcción Ltda. fue la encargada de construir este tramo piloto de la mano con Corasfaltos, tramo que evidenció muy buenos resultados a los ensayos físicos, químicos y mecánicos, siendo esto un éxito rotundo que abrió las puertas en el departamento de Antioquia para hacer futuras aplicaciones.

### **3. INTERROGANTES**

- ✓ ¿Como influyen los procesos de estabilización química de suelos en la capacidad portante de la subrasante?
- ✓ ¿Por que estos procesos de estabilización química de suelos reemplazan la estructura convencional de capas de Base y Subbase?
- ✓ ¿Como influye la baja permeabilidad de esta capa estabilizada en la vida útil de la estructura?
- ✓ ¿Por qué es económicamente viable la aplicación de esta metodología?

## 4. JUSTIFICACION

Conociendo la necesidad del mejoramiento de la infraestructura vial del país, y al mismo tiempo las alternativas que ofrece CORASFALTOS en el tema de la construcción vial, se identifico la importancia de realizar una evaluación de este nuevo sistema comparándolo con las alternativas tradicionales como un aporte al desarrollo tecnológico y constructivo para el sector vial.

El país es muy tradicional en cuanto a sus métodos constructivos y existe cierta negligencia por parte del Estado para invertir en desarrollo de nuevas tecnologías. Por este motivo es importante dar a conocer nuevos métodos constructivo como alternativas para construir vías con beneficios para el medio ambiente y ahorros económicos que oscilan entre el <sup>2</sup>20% y el 35% por Kilómetro de vía pavimentada, comparado con el método tradicional de bases y sub bases, como sucede con las metodologías de CORASFALTOS.

Esta evaluación fue enfocada en la aplicación de una técnica desarrollada por CORASFALTOS, la cual está fundamentada en el análisis de las características físico – químicas y mecánicas de los suelos para optimizar su desempeño; este documento pretende demostrar que la metodología proporciona grandes beneficios técnicos, económicos, ambientales, administrativos y sociales, ya que al utilizar el mismo suelo en la estructura de un pavimento se está ahorrando el suministro de bases y subbases, lo cual implica menos costos en transporte y a su vez mitiga el impacto ambiental de explotación de canteras y ríos. Al hablar de un ahorro significativo los entes gubernamentales pueden realizar más kilómetros de vías con la misma inversión presupuestada en el método tradicional, y así llegar al beneficio directo de la comunidad.

---

<sup>2</sup> Presupuestos realizados por la Empresa OPQ Ingeniería, Equipo y construcción Ltda.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar los beneficios técnicos y constructivos de la metodología desarrollada por CORASFALTOS (Estabilización química de suelos de subrasante) como alternativa para el mejoramiento de la estructura de pavimento en el tramo Camilo C. – Fredonia, sector el Tesoro, Departamento de Antioquia.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las ventajas y desventajas que tiene la tecnología tanto en la fase de estudios como en la constructiva.
- Determinar las condiciones físicas químicas y mecánicas, iniciales y finales de la subrasante.
- Realizar un diseño de una estructura tradicional de bases y subbases, con la capacidad portante del suelo estabilizado, para así con estos resultados determinar si estas estructuras granulares pueden ser reemplazadas por los suelos estabilizados.
- Estudiar e identificar los beneficios técnicos y constructivos que ofrece la aplicación de la tecnología frente al método tradicional de bases y sub bases.
- Evaluar costos, tiempo y rendimientos de ejecución realizando un análisis comparativo con los métodos tradicionales.



## 6. HIPÓTESIS

Realizando una estabilización química de subrasante es posible aumentar la capacidad de soporte de la misma, evitando así la utilización de capas granulares como parte de la estructura del pavimento, en el tramo de Camilo C – Fredonia, sector El Tesoro, en el Departamento de Antioquia.

## 7. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

La evaluación de esta tecnología y de su proceso constructivo fue realizada en el tramo el Tesoro, vía Camilo C- Fredonia, al sur oeste del Departamento de Antioquia a 52 km de la ciudad de Medellín.

En el desarrollo de este proyecto se realizó una evaluación técnica, económica, ambiental y social, la cual arrojó los resultados necesarios para argumentar el beneficio que tiene la aplicación de una nueva tecnología en el sector vial.



**Fotografía No.1 Ubicación del proyecto**

## **8. MARCO TEÓRICO**

La tecnología como tal tiene un principio científico y se basa fundamentalmente en el estudio e investigación de los suelos desde el punto de vista químico, físico y mecánico, con el fin de determinar los aditivos adecuados para mejorar las condiciones originales del terreno.

La esencia de la metodología se apoya en una planificación sistemática desde el inicio del estudio, el diseño y su construcción, convertido esto en una asistencia técnica permanente de la Corporación durante la ejecución del proyecto.

Esta tecnología fue desarrollada por CORASFALTOS entre los años 2000 y 2002, la cual se puso a prueba a lo largo de tres años y en más de 30 kilómetros de vías. Los científicos que la desarrollaron fueron los siguientes rusos: <sup>3</sup>Dra. Larissa Chiman, Ingeniera de Producción Química con Doctorado en Síntesis, modificación y caracterización de sustancias tensoactivas, y el Dr. Alexei Chiman, Ingeniero Químico con Doctorado en Cinética y Catálisis homogénea

### **8.1 FUNDAMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

La metodología está fundamentada en el principio de equilibrio molecular de los diferentes tipos de suelo, en los cuales se buscan diferentes agentes químicos que puedan actuar directamente en el suelo y equilibrar la composición química de este, la metodología de CORASFALTOS establece que estos agentes deben ser sólidos y líquidos, y las dosificaciones necesarias de estos, se determinan según las características del suelo a estabilizar. Un ejemplo básico se hace con los minerales arcillosos que están constituidos, entre otros, por la unión de tetraedros

---

<sup>3</sup> [www.corasfaltos.com](http://www.corasfaltos.com), grupo de investigación.

de sílice u octaedros de aluminio que en su agrupación dejan espacios hexagonales en los que caben iones  $\text{OH}^-$ .

Químicamente las partículas atómicas de estos componentes deben entrar a la molécula de sílice y de esta manera producir una reacción que produce el equilibrio molecular de la partícula de suelo. Al producirse este equilibrio la partícula libera el agua que se encuentra en ella y se produce la estabilización química del suelo, el cual se vuelve una capa impermeable debido a la reacción cementante que se produce en este proceso.

## **8.2 <sup>4</sup>PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN**

La estabilización química de suelos esta comprendida por una serie de procesos y estudios de laboratorio tanto físicos, químicos como mecánicos, para poder determinar las características de la subrasante y con que agentes químicos se puede crear la reacción molecular necesaria para que este suelo se consolide y se estabilice. A continuación se especifica cada uno de los procesos y laboratorios que comprende la metodología para obtener la cantidad exacta de químicos para la estabilización del suelo.

### **8.2.1 Análisis Granulométrico de suelos por tamizado (Norma: I.N.V. E-123)**

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de tamaños de partículas de suelo, por separación a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

---

<sup>4</sup> Datos suministrados por CORASFALTOS en su informe técnico inicial I-09-230.

### **8.2.2 Determinación del Límite Líquido, plástico e índice de plasticidad de suelos (Norma: I.N.V. E-125 y 126)**

Mediante este procedimiento se determina el límite líquido de un suelo, el cual es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

El límite plástico es la humedad más baja de un suelo con la que se pueden formar cilindros de suelo de 3 mm de diámetro sin que se desmoronen.

### **8.2.3 Análisis por Difracción de Rayos X: Procedimiento según Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD) Equipo: Difractómetro de Rayos-X marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB**

La difracción de Rayos X es la técnica analítica más precisa para identificación de minerales y/o compuestos cristalinos, pues se basa en la dispersión de rayos X generada por la red cristalina en direcciones y ángulos específicos para cada sistema cristalino. Ésta técnica permite conocer la composición en términos de fases cristalinas sin incluir material amorfo, tomando como 100% el total de las fases detectadas. El análisis se lleva a cabo sobre la muestra pulverizada manualmente en un mortero de ágata, sin ningún tratamiento químico, y con montaje desorientado o de distribución de partículas al azar de acuerdo con el PTE 153.010 del manual de procedimientos técnicos del laboratorio de DRX.

Los difractogramas dentro de la metodología se obtienen en un Difractómetro de Rayos-X marca Siemens modelo D500, equipado con lámpara de Cu. La evaluación de los difractogramas se realizó con ayuda del Software Diffrac Plus, con base en los materiales de referencia de la JCPDF (Joint Comité Powder Diffraction Files) comercializados por el *International Centre for Diffraction Data*, ICDD1.

La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación del difractograma o perfil de difracción de la muestra con los difractogramas de materiales de referencia o materiales puros reportados en las bases de datos cristalográficas. El difractograma de una sustancia pura, es como su huella digital y permite la identificación inequívoca de la estructura cristalina que posee el compuesto. Este análisis se basa en el Método de Hanawalt, en el que cada compuesto se identifica por los tres picos de difracción más intensos.

El cálculo de la concentración relativa de los compuestos identificados depende de diferentes fenómenos tales como: el grado de cristalinidad de la muestra, la absorción y fluorescencia de rayos X que pueden tener los compuestos presentes, y la probabilidad de dispersión coherente que tienen los distintos sistemas cristalinos.

#### **8.2.4 Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos: Proctor Modificado (Norma: I.N.V. E-142)**

Este método se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado, con un martillo de 4.54Kg que cae desde una altura de 18 pulgadas.

El procedimiento consiste en la compactación de una muestra en el molde correspondiente con la energía del martillo mencionado anteriormente, distribuyéndose en 5 capas de 55 golpes cada una.

Para obtener la grafica necesaria, se debe adicionar porcentajes de agua progresivamente a medida que se compacta cada punto. El ensayo se puede concluir cuando se encuentre una distribución de humedad vs. Peso, de

comportamiento ascendente al principio, y posteriormente en descenso para obtener el pico que represente la humedad optima.

Este valor indica la humedad a la cual el material va a permitir una mejor compactación en campo. En este caso se obtuvo, para facilitar el mezclado del agregado en frío.

#### **8.2.5 Relación de soporte del suelo en Laboratorio: CBR de Laboratorio (Norma: I.N.V E-148)**

Este método se emplea para determinar el índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte. El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad e igualmente se puede usar en muestras inalteradas tomadas en el terreno. El índice hallado se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado.

El procedimiento consiste en la compactación de una serie de muestras en los moldes correspondientes con la energía del martillo de 4.54Kg que cae desde una altura de 18 pulgadas, en 5 capas de 55, 26 y 12 golpes cada una. Seguidamente se sumergen las muestras en agua hasta que la expansión de los especímenes sea constante. El ensayo finaliza con la determinación de la resistencia de las muestras sumergidas.

#### **8.2.6 Capacidad de Intercambio Catiónico (Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG)**

La capacidad de canje de cationes se determina mediante la saturación y posterior lavado de la muestra de suelo, con una solución de acetato de amonio ( $\text{AcONH}_4$ )

cuyo pH se mantiene constante de modo que la disolución sea neutra o ligeramente alcalina. El exceso de sal adicionada se elimina mediante lavado con alcohol. El amonio retenido o fijado en el suelo se extrae mediante lixiviación con cloruro de sodio y posteriormente se titula el ácido clorhídrico formado por la adición de formaldehído neutralizado a la solución.

#### **8.2.7 Aluminio intercambiable o extractable (Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG)**

En el suelo tratado con solución de cloruro de potasio (KCl), el ión potasio ( $K^+$ ) reemplaza iones hidronio ( $H^+$ ) y aluminio ( $Al^{+3}$ ), formándose en solución ácido clorhídrico (HCl) y cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) titulada con solución estandarizada de NaOH.

#### **8.2.8 Contenido de carbonatos (Norma: Anal. Suelos JACKSON M)**

La valoración en extractos de suelos se realiza mediante titulación con ácidos inorgánicos fuertes, en presencia de fenolftaleína como indicador ácido-base.

#### **8.2.9 Contenido de materia orgánica fácilmente oxidable (Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG)**

La materia orgánica es oxidada mediante ácido crómico en presencia de un exceso de ácido sulfúrico, valorando por retroceso el exceso de ácido crómico con una disolución de sal ferrosa.

#### **8.2.10 Contenido de Cloruros (Norma: Procedimiento del Standard Methods)**

Se determinan en solución neutra o ligeramente alcalina, en donde por medio de el cromato de potasio se indica el punto final de la titulación de cloruros con nitrato de plata, precipitándose el cloruro de plata cuantitativamente antes de formarse el cromato de plata rojo.

#### **8.2.11 Contenido de Sulfatos (Norma: Procedimiento del Standard Methods)**

El sulfato presente en los extractos, se establece convencionalmente por gravimetría mediante la determinación cuantitativa de los iones sulfato en forma de sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) por precipitación con cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ). A bajas concentraciones en las cuales la cantidad de sulfato no precipita, se titula el exceso de ion bario (Ba) añadido, mediante un agente acomplejante (EDTA); esta valoración se realiza por retroceso.

#### **8.2.12 pH de saturación del suelo (Norma: INV E-131)**

El ensayo se realiza pesando una cantidad determinada de suelo y añadiendo sucesivas porciones de agua destilada sin agitar la muestra hasta que quede completamente humedecida toda la masa del suelo y después se añaden unas cuantas gotas más de agua, cuidadosamente, hasta que la superficie brille ligeramente. Después de haber alcanzado el contenido de humedad se agita el suelo con una varilla de vidrio y se añaden unas gotas de agua hasta que se forme una pasta suave que apenas fluya para cerrar el agujero dejado por la varilla. Se deja equilibrar la muestra durante una hora y se realiza la medición del pH por medio de un electrodo de vidrio.



### **8.2.13 Floculación - Aglomeración**

La floculación es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación. Es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos.

### **8.2.14 Reacción Puzolánica (“Puzzolanic”)**

Una puzolana es un material natural o artificial, que contiene fundamentalmente silicio o silicio y aluminio (el conjunto sílice más alúmina varía a menudo entre el 70 y el 80 %), esto les da un carácter ácido, y por tanto, una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente). Además la puzolana está compuesta de fase vítrea en su mayor parte, siendo la fase cristalina muy pequeña, lo que hace que sean materiales de alta reactividad.

La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño. Sin embargo finamente molida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido cálcico (activador) a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en el agua y que poseen características cementantes, es decir capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

### **8.2.15 Reacción de Carbonatación**

La carbonatación es una reacción química en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato cálcico insoluble.

La carbonatación es un proceso lento que ocurre en el suelo, donde la cal apagada (hidróxido cálcico) reacciona con el dióxido de carbono del aire formando

carbonato cálcico. Esta reacción, necesariamente se produce en medio acuoso, ya que el dióxido de carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico, y reaccionará con el hidróxido de calcio, obteniendo como resultado el carbonato de calcio y agua.

## **9. ANTECEDENTES**

En este numeral se presentan algunas de las investigaciones en las cuales se utiliza la estabilización química de los suelos como un mejoramiento de la subrasante. Los proyectos a continuación citados presentan algunas similitudes con la tecnología para construcción de vías con estabilización química de suelos de CORASFALTOS, en el tramo Fredonia – Camilo C, departamento de Antioquia.

**9.1 TITULO: EVALUACIÓN DE ADITIVOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS EXPANSIVAS**  
**AUTOR: Universidad Militar Nueva Granada**  
**FECHA: 2006**

Este estudio fue hecho en la Universidad Militar Nueva Granada, en la ciudad de Bogotá, Colombia, en el cual se muestra que las arcillas expansivas siempre han sido un problema y han generado pérdida de dinero. Esto se ha venido mitigando con la utilización de diversos métodos, que se orientan hacia su estabilización. En este caso fueron utilizados tres aditivos (cal, cenizas volantes y aceite sulfonado), los cuales disminuyen las propiedades de una arcilla altamente expansiva, como lo es la bentonita.

Este ensayo consistió en mezclar la bentonita con diferentes concentraciones de aditivos, y de esta manera obtener su caracterización física y mecánica, las cuales permitieron analizar el comportamiento de cada uno.

Este estudio encontró que las cenizas volantes requieren ser adicionadas en cantidades excesivas para lograr disminución del potencial de expansión a valores admisibles. Con la cal se encontró un valor óptimo del 10% ya que logró una reducción considerable en las propiedades expansivas de la bentonita. Los

resultados obtenidos con el aceite sulfonado evidenciaron que la estabilización electroquímica que lleva a cabo, requiere de factores ambientales favorables para desarrollar su efecto.

Se puede concluir que este estudio utilizó tres tipos de aditivos, mezclando cada uno con la bentonita para diferenciar los beneficios que cada mezcla brindó a este tipo de arcilla expansiva. Según este tipo de estabilización físico – química y sus resultados, se puede evidenciar que no se asimila a la tecnología desarrollada por CORASFALTOS de Estabilización química de suelos, ya que es un proceso de tanteo y prueba error, lo cual quiere decir que no es una metodología ya sustentada y aprobada, que si bien arroja resultados que traen algunos beneficios también trae aspectos negativos como lo son los altos porcentajes de aditivos en los ensayos de la cal y cenizas volantes, lo cual genera sobrecostos en el momento de aplicación en proyectos de infraestructura, y efectos negativos con los tipos de clima para el ensayo del aceite sulfonado, ya que nuestro país está ubicado en una zona tropical, en donde el clima es imprevisible.

**9.2 TITULO:** ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES MEDIANTE EL SISTEMA ARENA – EMULSIÓN ASFÁLTICA

**AUTOR:** Universidad Técnica Particular de Loja. (UTPL) y La Unidad de Ingeniería Civil Geología y Minas (UCG)

**FECHA:** 2006

Esta investigación fue realizada en Ecuador en la ciudad Loja en el sector de Shucos, la cual surgió debido a que en este país no se conoce de investigaciones referentes a la estabilización de suelos de subrasante con emulsión asfáltica. El fin de esta fue mejorar las características mecánicas del material encontrado en estos suelos. El proceso se basó en elaborar mezclas arena – emulsión con

diferentes porcentajes de emulsión catiónica de rotura lenta, ya que este material es el que predomina en esta zona.

Este tipo de mejoramientos de subrasante esta ligado directamente a los materiales, los cuales se encuentran cerca de esta zona de Shucos, Ecuador, lo que quiere decir que no es aplicable en otros sitios donde no se encuentre, ya que la emulsión catiónica es un material derivado del petróleo, y sus costos pueden ser elevados a mayores distancias. Este tipo de mejoramiento no se asimila a la metodología de CORASFALTOS, ya que es una estabilización física y requiere de materiales poco comunes los cuales se aplican con altas dosificaciones que afectan directamente el costo del mejoramiento del suelo.

**9.3 TITULO: TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL**

**AUTOR: Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y derivados de España. Ingeniero Ángel Sampedro Rodríguez**

**FECHA: 2005**

Esta investigación fue realizada en la ciudad de Madrid, España, la cual se baso en la mejora a largo plazo de los suelos arcillosos, aumentando su capacidad portante, para de esta manera obtener Subbase con buenas propiedades estructurales que con el tiempo se van incrementando. Se encontró que los porcentajes de cal necesario para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3% y el 8%, con esta cantidad de cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones de calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos Portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado.

En esta investigación se aconseja realizar un estudio detallado para alguna estabilización determinada, de cómo mejora la cal y de los parámetros resistentes del suelo, con lo cual se puede observar que no es tan precisa como la investigación de CORASFALTOS, ya que esta en cada clase de suelo aplica la metodología, la cual arroja como resultado el tipo de aditivos a utilizar y su dosificación, que generalmente no excede el 3% del volumen.

**9.4 TITULO: COMPORTAMIENTO DE SUELOS RESIDUALES DE DIORITA ESTABILIZADOS CON CAL Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO**

**AUTORES: MARIO ALBERTO RODRIGUEZ MORENO.  
CESAR AUGUSTO HIDALGO MONTOYA.**

**FECHA: 2005**

Este estudio científico fue publicado por la revista de la universidad de Medellín en el año 2005, el cual esta enfocado en el uso de la cal como agente estabilizador, principalmente el estudio se baso en la estabilización con cal de un suelo residual de diorita, donde se analizó el contenido de finos y el tiempo de curado de la mezcla sobre su resistencia a la compresión, la tracción indirecta y la penetración (CBR), tomando diferentes dosificaciones de cal para ver su evolución. Los resultados que arrojo el estudio fueron muy favorables ya que se demostró que el uso de la cal como agente estabilizador de suelos arcillosos y limosos, puede elevar la capacidad de resistencia de estos, asemejándolos a los materiales granulares como bases y subbases, teniendo en cuenta que la dosificación recomendada oscila entre el 6% y el 9%.

Estos resultados indican que la metodología de CORASFALTOS adopta estudios hechos previamente, ya que la cal es un material que incide mucho en esta, pero

se ve una gran diferencia en estos tipos de estabilización, ya que la presentada en este estudio es Física y no tiene los componentes científicos que determinan los procesos químicos, en donde el beneficio principal es bajar dosificaciones y por ende los costos de construcción de este tipo de aplicaciones.

**9.5 TITULO: ESTUDIO PARA LA UTILIZACIÓN DE CENIZAS  
PROVENIENTES DE LA CALDERA COGENERADORA  
PETROPOWER EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

**AUTORES: GUILLERMO THENOUX Z., Ingeniero Civil, MSc, PhD,  
HECTOR CARRILLO O., Ingeniero Civil, Investigador  
Asociado.**

**FECHA: 2004**

Este trabajo e investigación se basa en la utilización de cenizas FBC (combustión lecho fluido) como agente estabilizador, estas cenizas provienen de la planta generadora de electricidad PetroPower, la cual utiliza carbón Coke. La operación de esta caldera produce una cantidad considerable de cenizas hidratadas, las cuales contienen altos contenidos de cal. Los compuestos químicos que tienen estas cenizas son aptos para mejorar la capacidad portante de suelos finos arcillosos.

En este estudio e investigación se demostró que la dosificación ideal para estabilizar un suelo es del 20%, pero también muestra que estas arcillas son un poco expansivas, lo que indica que se debe tener en cuenta este factor, ya que al expandirse, el suelo se deforma y sus propiedades de resistencia pueden bajar.

## 10. MARCO CONCEPTUAL

Para desarrollar el trabajo de campo en un proyecto de construcción de vías a bajo costo con estabilización química de suelos de subrasante, es necesario conocer conceptos de mecánica de suelos relacionados con la investigación, como también los diferentes ensayos y laboratorios que permitieron caracterizar el suelo y la capacidad portante de este.

### 10.1 TIPOS DE SUELOS

A continuación se realiza un breve resumen acerca de la descripción de los tipos de suelos y de algunas de sus propiedades.

#### 10.1.1 Granulares:

Son los suelos que no poseen ninguna cohesión, y consisten en rocas, gravas, arenas y limos.

**10.1.1.1 Suelos Arcillosos:** Están formados fundamentalmente por arcilla, esta arcilla está constituida fundamentalmente por silicato de aluminio hidratado. Es un tipo de suelo que cuando esta húmedo o mojado resulta pegajoso, pero cuando está seco es muy fino y suave, dado que la arcilla esta formada por partículas diminutas de menos de 0,005 milímetros de diámetro. Desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo de suelo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado, porque



después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presentan un color marrón oscuro.

Los suelos arcillosos al secarse, quedan muy compactos y duros y se caracterizan por la aparición de grietas. La ventaja principal es que son suelos que conservan fácilmente la forma que les damos al trabajarlos.

Sabemos que se trata de un suelo arcilloso porque cuando tomamos un pedazo del mismo en las manos, podemos hacer fácilmente una bola. Igualmente, si colocamos un trozo de esta materia entre los dedos pulgar e índice y la trabajamos con ambos dedos, podemos realizar cintas de hasta 5cm con este tipo de tierra.

**10.1.1.2 Suelos Limosos:** Son los suelos que contienen una proporción muy elevada de limo. Es un tipo de suelo muy compacto, sin llegar a serlo tanto como los arcillosos. Estos suelos resultan producidos por la sedimentación de materiales muy finos arrastrados por las aguas o depositados por el viento. Suelen presentarse junto a los lechos de los ríos y son muy fértiles.

Sabemos que se trata de suelos limosos porque, al igual que los arcillosos, permiten formar bolas aunque estas se rompen con facilidad. A diferencia de los arcillosos no nos permiten formar cintas entre los dedos.

**10.1.1.3 Suelos Arenosos:** El suelo arenoso es el que está formado principalmente por arena. La arena son partículas pequeñas de piedra de carácter silíceo con un diámetro entre 0,02 y 2mm. A diferencia de la arcilla cuando está húmeda o mojada no se engancha. Los suelos arenosos no retienen el agua que rápidamente se hunde a capas más profundas. Son suelos considerados secos en donde hay muy poca humedad. A diferencia de los

suelos mencionados anteriormente requieren un riego continuado y un trabajo constante si queremos darle una forma determinada porque la pierden con facilidad. Presentan colores claros.

Sabemos que se trata de este tipo de suelo porque al coger un poco de él entre los dedos, somos incapaces de formar una bola. Este tipo de tierra, por mucho que lo manipulemos, seguirá estando suelto.

#### **10.1.2 Cohesivos:**

Son suelos que poseen características de cohesión y plasticidad. Dichos suelos pueden ser granulares con parte de arcilla o limo orgánico, que les importen cohesión y plasticidad, o pueden ser arcillas o limos orgánicos sin componentes granulares.

### **10.2 ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE**

Los ensayos que se explican a continuación fueron utilizados en la determinación de la capacidad portante de la subrasante inicial, con la cual se determinó el estudio físico, químico y mecánico para la estabilización, como también para el análisis final, en donde se confirmaron los beneficios técnicos y mecánicos que se obtuvieron al mejorar esta subrasante.

### **10.2.1 Penetrómetro Dinámico de Cono**

Penetrómetro portátil, constituido por una masa deslizante que se deja caer por gravedad sobre un yunque de impacto, y que por medio de una varilla transmite la energía a una puntaza cónica que se hincan en el terreno.

#### **10.2.1.1 Características técnicas**

- Martillo de impacto: masa deslizante de acero de 8 Kg.
- Recorrido de la masa: 575 mm.
- Varilla de acero de 16 mm de diámetro y penetración máxima 800 mm bajo la superficie (varilla suplementaria de longitud útil 400 mm).
- Puntaza cónica enroscable de 20 mm de diámetro y ángulo de cono 60°.

#### **10.2.1.2 Aplicaciones**

Utilización en capas granulares de firme

- Medida de la resistencia a la penetración.
- Determinación de espesores de las capas de firme.
- Evaluación de la capacidad portante de las capas de firme (correlación con índice CBR).
- Evaluación de las características mecánicas de los materiales de las capas de firme (correlación con el módulo de deformación).

### **10.2.2 Deflectómetro de Impacto**

Equipo constituido por una masa que se deja caer por gravedad, desde una altura determinada, sobre una placa, provista de un sistema de distribución, que

transmite la carga de manera uniforme a la superficie sobre la que se apoya. El Centro de Estudios de Carreteras dispone de dos equipos de este tipo, cuyas diferencias técnicas se señalan a continuación.

#### **10.2.2.1 Características técnicas**

A continuación se mostraran las características de los dos tipos de Deflectómetro:

##### **10.2.2.1.1 Deflectómetro de Impacto de 65 KN**

- La onda de carga simula la producida por un vehículo circulando a 70 km/h. El tiempo de carga es de 30 milisegundos y la carga máxima equivalente es de 65 kN.
- La deflexión debida a la carga se mide a través de cinco sismómetros situados uno en el centro de la placa, y los otros a distancias de 20, 30, 45 y 90 cm.
- El rendimiento del equipo (suponiendo una distancia entre puntos de medida de 25 m) es de aproximadamente 2 km/h.

##### **10.2.2.1.2 Deflectómetro de Impacto de 150 KN**

- La onda de carga simula la producida por un vehículo circulando a 70 km/h. El tiempo de carga puede ser de 40 ó 60 milisegundos y la carga máxima equivalente es de 150 kN.
- La deflexión debida a la carga se mide a través de siete sismómetros situados uno en el centro de la placa, y los otros a distancias de 30, 45, 60, 90, 120 y 150cm.
- Dispone de un sensor de infrarrojos para medir la temperatura de la superficie del pavimento.

- El rendimiento del equipo (suponiendo una distancia entre puntos de medida de 25 m) es de aproximadamente 2 km/h.

#### **10.2.2.2 Aplicaciones**

- Evaluación de la capacidad estructural de firmes flexibles, semirrígidos y rígidos.
- Evaluación de la transferencia de cargas en juntas de firmes de hormigón.
- Control de ejecución de coronación de explanada y capas granulares.

#### **10.2.3 Viga Benkelman**

Deflectómetro mecánico simple. Una palanca suspendida de un bastidor, transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador.

##### **10.2.3.1 Características técnicas**

- Bastidor: Viga de sustentación de la palanca de medida y del comparador.
- Palanca de medida de 3,60 m.
- Comparador: Aparato con limbo dividido en 0,01 mm con recorrido de 12mm.
- Palpador: Pieza metálica que reposa sobre el suelo en el punto de medida.

##### **10.2.3.2 Aplicaciones**

- Determinación estática de la deflexión elástica recuperada del firme.
- Determinación de la deformada originada por la carga con relación al punto de medida fijo.

#### **10.2.4 Ensayo de CBR**

El ensayo C.B.R (ensayo de Relación de Soporte de California), mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte pero, de la aseveración anterior, es evidente que éste número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica al estado en el cuál se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado.

El número C.B.R se obtiene como la relación de la carga unitaria (en Lbs. /plg<sup>2</sup>) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 cm<sup>2</sup>) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

El C.B.R varía de acuerdo a la compactación del suelo, su contenido de humedad al compactar y cuando se realiza el ensayo.

Los ensayos del C.B.R. pueden ser realizados “In Sito” usando el equipo correspondiente al laboratorio tanto en muestras inalteradas como en compactadas. Los ensayos “In sito” se realizan solamente en el suelo con el contenido de humedad existente.

Han sido pensados procedimientos para preparar la muestra de laboratorio de diferentes clases de suelos con el fin de reproducir las condiciones que verdaderamente se producirán durante y después de la construcción. Estos procedimientos se aplican cuando el contenido de humedad durante la construcción va a ser el óptimo para tener la máxima densidad, además el suelo va a ser compactado al menos al 98%. Si se utilizarían otros medios para

controlar la compactación, los procedimientos deberían ser modificados de acuerdo a ellos.

En forma de ecuación esto es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{CARGA UNITARIA DEL ENSAYO}}{\text{CARGA UNITARIA PATRON}} \times 100$$

De ésta ecuación se puede ver que el CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación, se pueden ver en la tabla No.1.

**Tabla No.1 Valores de carga unitaria**

Penetración		Carga Unitaria Patrón		
mm	Pulgada	Mpa	Kg/cm2	PSI
2,54	0,1	6,90	70,00	1000
5,08	0,2	10,30	105,00	1500
7,62	0,3	13,10	133,00	1900
10,16	0,4	15,80	162,00	2300
12,7	0,5	17,90	183,00	2600

**Fuente: MERRIT, F. Manual del ingeniero civil, Vol. 1, editorial MC GRAW HILL, 2000.**

El C.B.R usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm es mayor el ensayo debería repetirse. Si un segundo ensayo, produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptima para el suelo específico determinado, utilizando el ensayo de compactación.

## 11. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presentan todas las actividades necesarias para la ejecución de este proyecto, las cuales inician a partir de la presentación de la propuesta económica y terminan con la ejecución del proyecto y evaluación de los resultados. Se describen las fechas de realización de las actividades y los responsables de cada una de ellas.

- Presentación propuesta técnico económica, incluye estudios, diseños y construcción. Presentada a la Gobernación de Antioquia en Agosto de 2009 (ver anexo 3).
- Estudios de campo y muestreos: En el tramo de vía que se estabilizó y evaluó en Fredonia - Camilo C, en el Departamento de Antioquia, de aproximadamente 200 ml por 9m de ancho de corona, se realizaron dos auscultaciones del suelo, el día 19 de Agosto de 2009 y fueron tomadas por el Ingeniero Ricardo Patiño Solano, Director de proyectos de CORASFALTOS, en ellas se identificaron las caracterizaciones físicas, químicas y mecánicas del suelo. El proceso se describe a continuación y sus definiciones se encuentran sustentadas en el marco teórico y conceptual:
  - ✓ Determinación de los parámetros Físicos y Mecánicos, por medio de los siguientes ensayos:
    - Determinación en el laboratorio del contenido de agua y humedad INV E-122
    - Granulometría por tamizado INV E-123



- Granulometría por hidrómetro INV E-124
- Límite líquido. INV E-125
- Límite plástico e índice de plasticidad INV E-126
- Determinación del peso específico INV E-128
- Equivalente de arena de suelos. INV E-133
- Relaciones peso unitario-humedad INV E-142
- Compresión simple o inconfiada. INV E-152
- Ensayo de CBR (California Bearing Ratio). INV E-148
- Permeabilidad de suelos. INV E-130
- Consolidación unidimensional de suelos. INV E-151

✓ Determinación de característica Químicas y Mineralógicas:

- Difracción por rayos X (DRX).
  - pH (Actividad de iones Hidrógeno).
  - Contenido de minerales y sales solubles.
  - Microscopía Electrónica.
  - Absorción Atómica.
  - Espectrometría Infrarroja.
  - Capacidad de Intercambio Catiónico CIC.
  - Capacidad de Intercambio Aniónico CIA.
- Recolección de datos de transito: Este estudio de transito fue entregado por la gobernación de Antioquia a CORASFALTOS en el mes de junio de 2009, visita realizada por el ingeniero Luis Sanabria, Director ejecutivo de esta Corporación.

- Evaluación de resultados de las pruebas químicas y determinación de aditivos: Esta actividad fue realizada en la Corporación por los químicos rusos: <sup>5</sup>Dra. Larissa Chiman, Ingeniera de Producción Química con Doctorado en Síntesis, modificación y caracterización de sustancias tensoactivas, y el Dr. Alexei Chiman, Ingeniero Químico con Doctorado en Cinética y Catálisis homogénea.
- La ejecución de los ensayos al suelo muestreado tanto químicos, físicos como mecánicos, fueron realizados en el laboratorio de CORASFALTOS por el Ingeniero y las fechas de elaboración se muestran en la tabla No.2.

---

<sup>5</sup> [www.corasfaltos.com](http://www.corasfaltos.com), grupo de investigación.

**Tabla No.2 Listado de ensayos realizados al suelo**

	<b>Fecha</b>	<b>Ensayo</b>
<b>SUELO</b>	2009/08/24	Capacidad de intercambio catiónico
	2009/08/24	Contenido de aluminio extractable
	2009/08/24	Contenido de carbonatos
	2009/08/24	Contenido de carbono orgánico total y ácidos fúlvicos
	2009/08/21	Contenido de cloruros
	2009/08/21	Contenido de sulfatos
	2009/08/21	Contenido de Bicarbonatos
	2009/08/21	Contenido de sales solubles
	2009/08/21	Determinación del pH
	2009/08/21	Materia orgánica por ignición
	2009/08/24	Limites de plasticidad
	2009/09/14	Análisis granulométrico
	2009/09/15	Peso específico del suelo
	2009/08/26	Proctor modificado
	2009/09/15	Relación de soporte, CBR
	2009/08/31	Difracción de rayos X

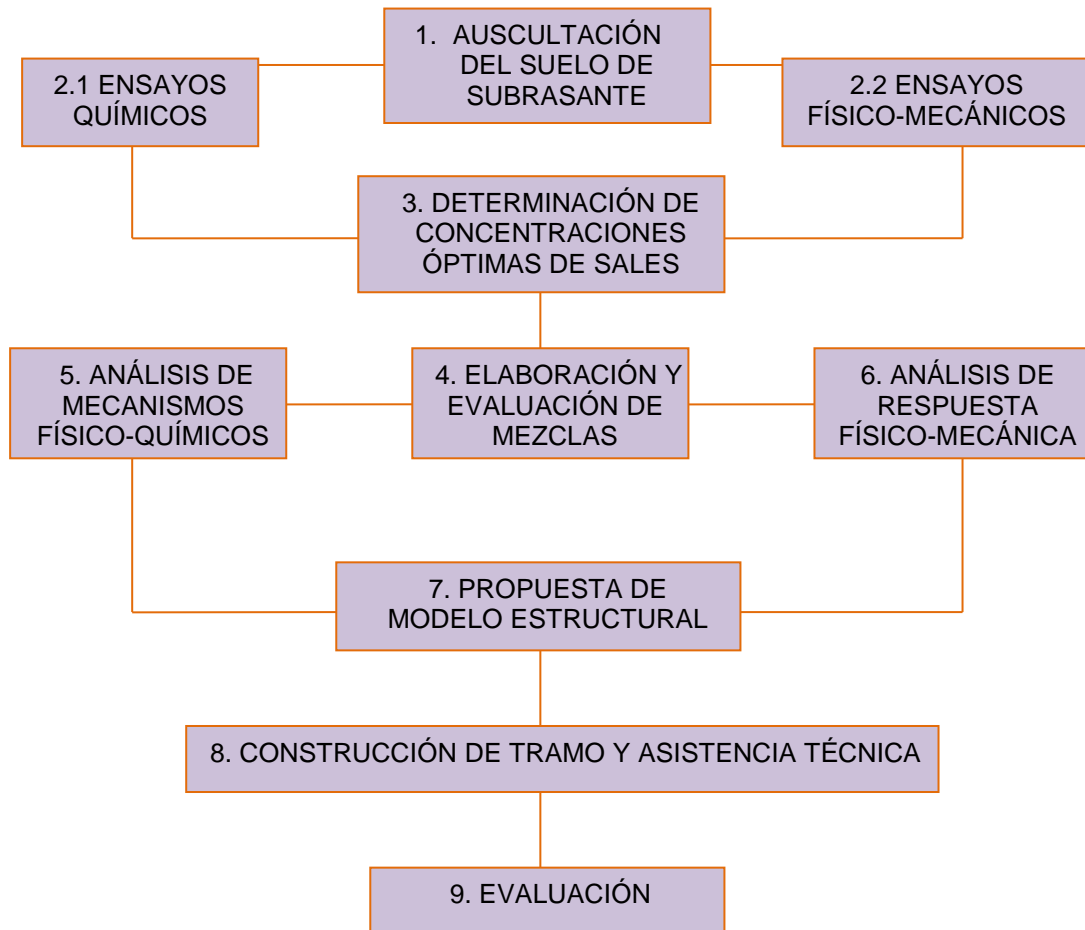
**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

- Diseño de la estructura de pavimento con la capa de suelo estabilizada: Este fue realizado por el Ingeniero Ricardo Patiño Solano, utilizando el método de la AASHTO, el cual se puede ver en la tabla de diseño que se adjunta, y fue modificada para trabajar una estructura monocapa. Los datos que se toman para este diseño, como CBR y módulos resilientes, son tomados de los resultados iniciales que se muestran en este estudio.

- Elaboración del informe para la construcción de la obra.
- Elaboración de la programación de obra, la cual fue elaborada por el Ingeniero auxiliar Pablo Prada, estudiante de la Universidad Libre.
- La construcción del tramo piloto: esta tardó 19 días y tuvo el acompañamiento del Ingeniero Jesús Quintana de la Empresa OPQ Ingeniería, equipo y construcción Ltda., como residente de obra y de los Ingenieros auxiliares Pablo Prada y Ximena López Giraldo de la Universidad Libre. En este estudio se explica el proceso constructivo con profundidad.
- Asistencia técnica de CORASFALTOS.
- Evaluación de los resultados del mejoramiento de los suelos, se realizaron ensayos de densidades durante la obra, y una vez finalizada, se complementó con CBR inalterado, viga benkelman y Penetrómetro dinámico de cono PDC.
- Evaluación de los rendimientos de la obra.
- Elaboración del informe final.

## 11.1 MODELO DEL PROCESO METODOLÓGICO:

**Gráfica No.1 Modelo de proceso metodológico**



**Fuente: Realizado por los investigadores.**

## **11.2 PROCESO CONSTRUCTIVO APLICADO EN LA VÍA CAMILO C – FREDONIA, K9+400 DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

A continuación se presenta el procedimiento constructivo que se aplicó en el proceso de estabilización química de suelos desarrollado por CORASFALTOS en el tramo de vía Fredonia – Camillo C, Departamento de Antioquia. En este paso a paso constructivo se muestran una serie de actividades de trabajo hecho en obra como también los inconvenientes que se tuvieron.

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio entregados por CORASFALTOS los cuales indicaban que tipo de materiales químicos se aplicarían y en que proporción, se procedió a citar una reunión conjunta entre contratistas, contratantes e interventores, en la cual se determinaron todas las pautas de inicio de obra tales como: cotas, abcisado, niveles, y geometría exacta de la vía por parte de interventoría, y toda la aplicación y proceso constructivo por parte del contratista según los diseños entregados previamente, en este momento se indicó que el proceso constructivo no tomaría mas de 15 días.

Localizados en el sitio de la obra se determinó hacer una serie de pruebas químicas a los materiales suministrados, como también revisión de la maquinaria, con lo cual se haría un tramo de prueba y calibración, donde se ajustaron los tiempos de ejecución por máquina y la longitud a intervenir por día.

Normalmente para este tipo de estabilizaciones químicas se recomiendan espesores mínimos de 25 cms, los cuales deben ser trabajados en monocapa, para este tramo de vía el diseño arrojó un espesor de 30 cms los cuales debían ser trabajados también en monocapa con un cilindro compactador de mínimo 10 Ton, pero debido a la poca disponibilidad de este tipo de maquinaria en la región se utilizó un cilindro compactador Ingersoll Rand SD 70, el cual tiene una

capacidad de compactación de 7 Ton, debido a esto en obra se tomó la decisión de trabajar una estructura bicapa para que el suelo asimilara bien la capacidad de compactación y las densidades fueran las óptimas exigidas en el diseño, todo esto alteró la programación de obra que se tenía, ya que el hacer un proceso bicapa tomó el doble del tiempo de ejecución, debido a que se hicieron tramos mas cortos, se tuvo que acopiar el material en bancos y el proceso de mezclado fue mas riguroso.

El proceso constructivo teniendo en cuenta los anteriores parámetros, se presentó de la siguiente manera:

#### **11.2.1 Estado inicial del Terraplén**

El terraplén pese a no perder sus capacidades portantes iniciales en toda su estructura, sufrió cierto desgaste por cuenta del intemperismo en el que se encontraba. Se puede observar en la fotografía No. 2 que la superficie no era impermeable y por el efecto de escorrentía se crearon canaletas con profundidades de hasta 3 cms, por las cuales corría el agua. Con la estabilización química se realizó un mejoramiento total de esta superficie, volviéndose impermeable y totalmente nivelada.



**Fotografía No.2 Estado inicial del terraplén**

### **11.2.2 Nivelación**

Se contó con una comisión de topografía, la cual verificó los niveles de la vía tanto longitudinal como transversal, de igual forma los espesores de escarificación según el diseño, como se muestra en la fotografía No 3. El abscisado de la vía estaba conformado por 20 tramos de 10 ml cada uno, con los cuales la comisión de topografía verificó la nivelación hecha por la motoniveladora. La duración de este trabajo fue de aproximadamente 1 día.



**Fotografía No.3 Nivelación de la vía**

### **11.2.3 Sectorización (Tramos de trabajo)**

Ya teniendo todo el terraplén nivelado desde el K0+70 hasta el K0+270, se hizo un diagrama de trabajo el cual le diera continuidad a la obra y el uso casi total a la maquinaria disponible. Este tramo de 200 ml se dividió en 8 subtramos de trabajo, 4 tramos de 50 ml en primera fase desde el nivel -0.30m hasta -0.15m y 4 tramos mas en el nivel superior de la estructura desde -0.15m hasta 0.00m, teniendo en



cuenta que entre las capas se debía esperar la toma de densidades para así poder seguir con la capa superior.

#### **11.2.4 Escarificación del suelo natural**

Una vez sectorizado el tramo a intervenir se procedió a escarificar con retroexcavadora los 30 cms de estructura de suelo a estabilizar. Al hacer esta excavación se dejó material escarificado para la primera capa y con el material sobrante se hizo un banco, para así facilitar el proceso de mezclado de aditivos en éste y en la primera capa, ver fotografías No. 4 y 5. Una vez mezclada esta primera capa se procedió a la compactación, sin afectar el proceso de mezclado y compactación de otras capas. Este proceso es también llamado ajedrez es utilizado para optimizar y agilizar los procesos constructivos, ver fotografías No. 5 y 6.



**Fotografía No.4 Escarificación del suelo    Fotografía No.5 Mezclado del suelo**



**Fotografía No.6 Método de ajedrez**

#### **11.2.5 Aditivos Químicos**

Se distribuyeron los aditivos químicos en la vía (ver fotografías No.8 y No.9), los cuales fueron, oxido de calcio con una concentración mínima del 80 % en aditivo sólido, y silicato de sodio ( $\text{NaCl}$ ) con una concentración mínima del 45% en aditivo líquido. Las proporciones al volumen eran de 1.3 % y 0.2 % respectivamente, según el estudio y diseño previo.

#### **11.2.6 Aplicación del aditivo Sólido, Oxido de calcio: ( $\text{CaO}$ )**

Para la aplicación de la Cal se estimó la longitud de trabajo y la cantidad de material químico que se debía distribuir en cada tramo de 50 ml, según la presentación de estos. Se colocaron los sacos de  $\text{CaO}$  en distancias proporcionales a la longitud de trabajo y se regaron teniendo en cuenta una buena distribución, como se puede observar en las fotografías No.7 y 8. En esta etapa de construcción se trabajo con 6 personas.



**Fotografía No.7 Distribución aditivo Solido**



**Fotografía No.8 Riego aditivo Solido**

#### **11.2.7 Aplicación del aditivo Líquido, Silicato de Sodio (NaCl)**

El aditivo líquido se distribuyó una vez colocado y mezclado el aditivo sólido con el suelo. Teniendo en cuenta que es un aditivo viscoso, se mezcló con agua para hacerlo mas líquido y se verificó que la aplicación no se saliera de las proporciones sugeridas en el estudio. Este se aplicó con un carro tanque y una flauta como se puede observar en la fotografía No. 9.



**Fotografía No.9 Distribución aditivo Líquido**

#### **11.2.8 Colocación de agua de prehumectación**

Antes de haber iniciado cualquier proceso de escarificación, mezclado y compactación, se obtuvo el valor de humedad natural del terreno mediante el ensayo correspondiente. La humedad óptima fue de 12,9 % y la densidad máxima fue de 1,862 g/cm<sup>3</sup>, según la norma de ensayo INV – E- 135/150, para calcular la cantidad de agua requerida por el suelo del sector a estabilizar. Se adicionó el agua y se verificó el dato final, con un humedómetro o un Speedy, el cual se ajusto siempre al valor de humedad óptima arrojada en el ensayo de Proctor modificado de la muestra aditivada. Para este proceso se utilizaron un carro tanque y una flauta como se puede ver en la fotografía No.10



**Fotografía No.10 Colocación de agua de prehumectación**

#### **11.2.9 Mezclado del Suelo + Aditivos + Agua**

Se procedió a mezclar y homogenizar el suelo con los aditivos y el agua de prehumectación, se verificó que tanto los aditivos como el agua de prehumectación estuvieran totalmente mezclados y homogenizados. Con este proceso de prehumectación el suelo adquirió la humedad óptima necesaria para ser compactado y empezar su reacción química interna, tal como se puede ver en la fotografía No.11.



**Fotografía No.11 Mezcla de Suelo + Aditivo + Agua**



#### **11.2.10 Extensión y nivelación del suelo mezclado y homogenizado**

En esta etapa se extendió el suelo ya mezclado y homogenizado en capas, se niveló y se realizó un seriado, teniendo en cuenta la nivelación longitudinal y transversal, como se puede observar en la fotografía No.12. En esta parte del proceso se tuvo permanente acompañamiento de la comisión topográfica por parte del contratista y de interventoría.



**Fotografía No.12 Extensión de mezcla**

#### **11.2.11 Compactación de las capas**

Una vez nivelada cada capa, se procedió a compactar cada una, con un cilindro SD 70 de capacidad de compactación de 7 Ton. Para cada tramo se realizaron tres pasadas homogéneas con el cilindro, pero se identificó que el terraplén al tener una pendiente significativa y por el suelo ser tan fino, suelo tipo CL-ML, no se dejaba compactar de forma descendente ya que se creaban fisuras en la superficie; por este motivo se optó por hacer una compactación de forma

ascendente con el cilindro de modo vibratorio y descendente con el cilindro estático, sin vibración, y de esta manera la superficie sellara. Una vez sellada la superficie se procedió a compactarla solo ascendentemente para no generar más este fenómeno de agrietamiento, proceso que se efectuó dos veces. Ya compactada la subrasante se procedió a humectar la superficie con agua para hidratar la reacción química y así terminar de sellarla, como se observa en la fotografía No.13.

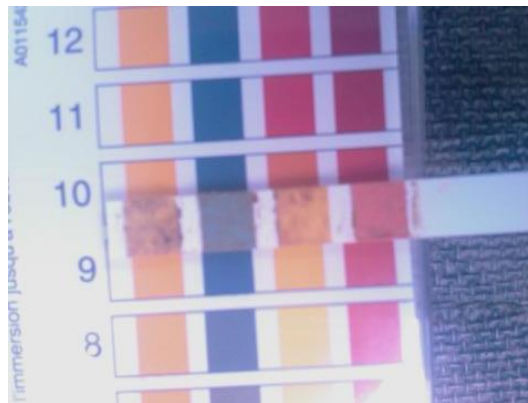


**Fotografía No.13 Compactación del suelo Aditivado**

### 11.3 FACTORES TENIDOS EN CUENTA EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO

Además de lo visto en el numeral anterior (11.2), también se tuvo en cuenta en este proceso lo siguiente:

- ✓ Constantemente se realizaba una medición del pH, todos los días al ser mezclado el suelo con el aditivo y también al ser compactado. (ver fotografía No.14)



**Fotografía No.14 Peachímetro**

- ✓ Se controló el espesor de 30 cms de estructura de subrasante estabilizada.
- ✓ Se garantizó la homogenización del suelo + aditivos + agua de prehumectación, ya que una vez extendida la mezcla de aditivos y el suelo, se utilizaba un arador agrícola. Esta mezcla normalmente se hace con una recicladora – estabilizadora, pero por motivos económicos y de cantidades de obra, no se justificaba el transporte de esta máquina. (Ver fotografía No.15)





**Fotografía No.15 Mezcla con Arador agrícola**

- ✓ Entre cada capa se verificaron densidades de campo, las cuales se encuentran en los resultados de este estudio. Estas fueron realizadas con el método del cono de arena.

## **12. RESULTADOS**

### **12.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN INICIAL DE LA SUBRASANTE**

Se identificó que esta fase, en la cual se realizaron las perforaciones y ensayos para la caracterización de los parámetros físico-químicos del suelo, fue muy importante dentro del proyecto de investigación, ya que durante ésta se determinó de forma clara el tratamiento de estabilización, y por ende la complejidad del estudio y diseño inicial.

Este proceso de muestreo y auscultaciones del tramo comprendido entre el k0+70 hasta el k0+270 del terraplén ubicado en la variante el tesoro, vía Camilo C – Fredonia en el Departamento de Antioquia, tomó 3 días. A continuación se presenta un resumen de los procesos y resultados iniciales obtenidos a partir de estas muestras, como también del proceso de determinación de aditivos químicos tanto líquidos como sólidos recomendados para la estabilización de éste.

Los resultados y procedimientos que se presentarán a continuación hacen parte del estudio hecho por CORASFALTOS, donde se determinó paso a paso el diseño y estudio de la vía en mención.

Se tendrán en cuenta dos fases, en la primera se verán las condiciones iniciales del suelo y en la segunda se verán las características de este cuando fue aditivado.

### 12.1.1 FASE 1: Suelo Natural

A continuación se mostrarán las características iniciales físicas, químicas y mecánicas del suelo antes de ser aditivado:

#### 12.1.1.1 Análisis físico a las muestras de suelo

En la tabla No.3, se presentan los valores de pruebas realizadas al suelo original, presentando un Índice de plasticidad relativamente bajo del 8%, con un CBR de 18% como valor de CBR inalterado y por formulación indirecta, el CBR se encuentra entre un 18 y un 35% de acuerdo con las correlaciones con el Penetrómetro dinámico de Cono PDC y deflexiones con viga benkelman.

**Tabla No.3 Resumen de las propiedades preliminares de los suelos analizados**

Código	Clasificación SUCS	L.L.	L.P.	I.P.	Peso Específico	Humedad Óptima (%)	Densidad Seca Máxima g/cm <sup>3</sup>
G-207-09-01	CL-ML	26	18	8	2,626	12.9	1,862

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

En donde:

Código = Numero interno manejado por CORASFALTOS

CL = Arcilla limosa

ML = Limo arcilloso

L.L = Límite Líquido

L.P = Límite Plástico

I.P = Índice de plasticidad

### 12.1.1.2 Análisis químico del suelo

Según el análisis mineralógico del suelo, arrojado por el difractómetro de rayos X, en la tabla No.4 mostrada a continuación, se verán los porcentajes de cada material que constituye el suelo del terraplén.

**Tabla No. 4 Porcentaje de material constituyente del suelo del terraplén**

Nombre del compuesto	Fórmula	G-207-09-01 ARENA (MALLA # 40) %PESO
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	50
Albita	Na <sub>0.986</sub> (Al <sub>1.005</sub> Si <sub>2.99508</sub> )	20
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tr
Goetita	Fe + 30(OH)	ND
Minerales Arcillosos		25
Otros		<5

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Tr y ND: Medidas de equivalencia del difractómetro

#### 12.1.1.2.1 Caracterización química al suelo sin estabilizar

La tabla No. 5 muestra los resultados que arrojó el análisis químico del suelo original. Estas características químicas fueron la base para que CORASFALTOS aplicara su metodología científica, este proceso no fue suministrado para este estudio, ya que hace parte de la reserva del sumario de esta Corporación. En base a estos resultados, los científicos químicos optaron por realizar ensayos con tres aditivos, los cuales se pueden observar en la tabla No.10, siendo la cal y el silicato de sodio, los que más influyeron en el mejoramiento de la capacidad portante del suelo.

**Tabla No. 5 Resultados de análisis químico del suelo original**

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA							
Código	pH	Carbonatos meq/100 g	Sulfatos ppm	Cloruros meq/l	C.I.C., meq/100 g	Acidez Intercambiable meq/100 g	Aluminio Extractable meq/100 g
G-207-09	6,76	0	<200	0	21,69	0,21	0
	Sales Solubles %	Bicarbonato s meq/100 g	%M.O. (Método Volumétrico)	%M.O. (Ignición)	Cloruros meq/l	-	-
	0,1	0,1	1,02	2,90	0	-	-

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

### 12.1.1.3 Análisis mecánico del suelo

A continuación se muestran los resultados de los ensayos a los cuales fue sometido el terreno en estudio, antes de realizar la estabilización química.

#### 12.1.1.3.1 Viga Benkelman

Se paso la viga benkelman en todo el sector en una longitud de 200m del K0+070 al K0+270. Se presentan deflexiones muy aceptables sin detectarse sitios críticos que puedan afectar el proceso de estabilización. Se tomaron puntos cada 40m, en los tres lados de la vía (Izquierdo, eje y derecho). Los resultados se incluyen en la tabla No.6.

**Tabla No. 6 Resultados Viga Benkelman**

<b>ABSCISA</b>	<b>D<sub>0</sub> PROM.</b>	<b>DESV. STANDAR</b>	<b>D<sub>c</sub> (1/100mm)</b>	<b>D<sub>Adm</sub> (1/100mm)</b>
K0+070	24.9	16.8	41.8	95
K0+110	29.1	6.07	35.1	95
K0+150	30.1	5.01	35.2	95
K0+190	32.3	3.60	35.9	95
K0+230	23.3	8.3	31.7	95
K0+270	22.4	8.03	30.4	95

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Donde

D<sub>0</sub> = Eje axial

D<sub>c</sub> = Deflexión característica

D<sub>Adm</sub> = Deflexión admisible

Los resultados obtenidos no presentan sitios críticos ya que todos los valores están por debajo de la deflexión admisible y los valores como tal son muy homogéneos

#### **12.1.1.3.2 Penetración de Cono Dinámico**

Se realizaron 3 pruebas con el cono dinámico en todo el tramo de 200m. En la tabla No.7, se presentan los sitios de realización de las pruebas y la observación acerca de la estratigrafía de la zona.

**Tabla No. 7 Abscisas para realizar pruebas de PDC y muestreo**

Sector	Apique No.	Abscisa	Observaciones
1	1	K0+070	Estratigrafía de suelos homogénea
2	2	K0+130	Estratigrafía de suelos homogénea
3	3	K0+220	Estratigrafía de suelos homogénea

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

El ensayo de Cono dinámico permite conocer la resistencia del suelo al efecto de corte, y correlacionar su valor de CBR. El CBR relacionado con el PDC se calculó con formulación empírica, pero con aproximación al dato real, estos valores los correlacionamos con el CBR determinado con las deflexiones (viga Benkelman), en la tabla No.8 se observa el valor de CBR correlacionado, el cual se determino apartir de la ecuación:

$$\text{CBR} = 292/(\text{PDC})^{1.12}$$

**Tabla No. 8 Valores de PDC Y CBR Correlacionado**

Sondeo	Abscisa	Índice PDC mm/golpe	CBR %	Clasificación de la subrasante de acuerdo con el Invías
1	K0+070	12	20	S5
2	K0+130	10	24	S5
3	K0+262	7	35	S5

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

S5: En esta categoría están los suelos de origen ígneo, depósitos aluviales y arenas eólicas.

Se encuentran CBR bastante buenos para el tipo de subrasante, con un promedio de 26%, siendo un valor alto.

El modulo resiliente se calculó de acuerdo al modelo de Hogg y se define así:

$$MR = 1091314,96 * (Doprom * R50)^{-0,939}$$

Este es directamente proporcional al valor de CBR, por lo tanto para módulos altos, CBR altos, esto es lo que se observa en los valores de la tabla No.9, con CBR entre 25 Y 40%, con un CBR de diseño de 31%.

**Tabla No. 9 Valores de Módulo Resiliente y CBR**

<b>Abscisa</b>	<b>Módulo Resiliente KG/CM2</b>	<b>CBR %</b>
K0+070	1648	35
K0+110	1427	29
K0+150	1380	27
K0+190	1294	25
K0+230	1754	33
K0+262	1823	40

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**



### **12.1.2 FASE 2: Suelo Aditivado en Laboratorio**

A continuación se mostrarán las características finales del suelo al ser aditivado en el laboratorio de CORASFALTOS. Estos datos fueron usados para realizar el diseño de pavimento con la capa de suelo aditivado.

#### **12.1.2.1 Relación de soporte del suelo estabilizado (CBR)**

Una vez caracterizado el suelo fue mezclado con aditivos, los cuales fueron Cal al 80% y Silicato de Sodio al 42%, en cantidades como se puede ver en la tabla No.11, este se dejó curando durante 14 días. Después de este periodo fue inmerso en agua durante 96 horas, como lo dice la norma INV-E-148 (CBR de laboratorio), y se falló para obtener el valor de CBR. En el anexo 1 se presenta el diseño realizado por CORASFALTOS y se incluyen los datos obtenidos en laboratorio.

Al analizar la tabla No.10 se observó que el diseñador optó por escoger la combinación de Cal y Silicato de Sodio en proporciones del 1,5% y 1,0% respectivamente, ya que esta dosificación alcanzaba un CBR del 143% y bajaba el índice de plasticidad del 8% inicial al 1,1% estabilizado (ver anexo 1), ensayo realizado por el laboratorio de Corasfaltos el 15 de septiembre de 2009. Basado en este resultado, realizó un análisis que determinó las cantidades de aditivos sólidos y líquidos que alcanzaran un CBR aproximado del 100%, dichas cantidades se pueden ver en la tabla No.11.

**Tabla No.10 Resultados de CBR al material G-207-09-01.**

	MATERIAL ADITIVO			% CBR (AL 98% DE LA DENSIDAD PROCTOR)
	CAL	SILICATO	FOSFATO TRISODICO	
% Respecto al suelo seco	*	*	*	13,1
	1,0	*	*	42,3
	1,5	*	*	108,7
	1,5	1,0	*	143,0
	*	*	1,0	13,8

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Se puede analizar que utilizando Cal al 1.5% también se alcanza un CBR óptimo, pero la metodología indica que se necesitan los componentes sólidos y líquidos para producir la cementación en las partículas del suelo. Fue así que el Ingeniero Ricardo Patiño de CORASFALTOS autorizó a la empresa OPQ ingeniería, equipo y construcción Ltda., a utilizar la dosificación de 1,3 % de oxido de cal y 0,2% de silicato de sodio, ya que al interpolar estos datos se observó que el CBR promedio se aproximaba a 100%.

En la tabla No.11 se muestran las cantidades aproximadas de aditivos tanto sólidos como líquidos, los cuales fueron utilizados en el tramo de 200m x 9m de ancho.

**Tabla No.11 Cantidad de Aditivos**

ABSCISA	CANTIDAD ADITIVO %	CANTIDAD EN PESO Ton.
K0+070-K0+262	1.3% OXIDO DE CAL (Cal Viva)	14 Ton.
	0.2% Silicato de Na	2.8 Ton.

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

A continuación se mostrará la caracterización de los aditivos sólidos y líquidos que fueron utilizados en la mezcla para la estabilización química de suelos de CORASFALTOS, en el tramo Camilo C. – Fredonia, k9+400, Departamento de Antioquia.

**Tabla No. 12 Calidad de los aditivos**

<b>CaO (Cal Viva)</b> <b>Presentación: Polvo</b> <b>CaO= 80%</b> <b>Tam. Max. Partículas: tamiz No. 40</b>	<b>Silicato de Na</b> <b>Presentación: Liquido</b> <b>Na<sub>2</sub>O%=8.74-9.74</b> <b>SiO<sub>2</sub>%=26.2 – 30.6</b>
---	---

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Teniendo las cantidades y calidades de aditivos a utilizar, se realizó el ensayo de Proctor Modificado con material aditivado, el cual dio como resultado las características mostradas en la tabla No.13.

**Tabla No.13 Características ensayo de Proctor Modificado al suelo aditivado**

CANTIDAD ADITIVO %	HUMEDAD OPTIMA %	DENS. MÁX g/cm <sup>3</sup>
1.3% OXIDO DE CAL (Cal Viva) 0.2% Silicato de Na	12.9	1.862

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

### 12.1.2.2 Estudio de Transito y Diseño

Para cuantificar el espesor del suelo a estabilizar químicamente y con el fin de garantizar que la capa mejorada asimilara bien las cargas de transito, se propuso un diseño con base en el transito supuesto de servicio en el carril de diseño de  $1.0 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8.2 toneladas, teniendo en cuenta que la vía puede tener un tránsito atraído con incremento regular por año. El diseño propuesto esta basado en los parámetros AASHTO 93, y se limitan a esfuerzos admisibles y deformaciones de materiales (ver anexo 1). Posteriormente y por sugerencia de la interventoría, se adoptó un N nuevo, para tener un diseño de transito mas preciso. Este se calculo y se realizó de acuerdo a datos y clasificación del transito, suministrados por el departamento técnico de la gobernación de Antioquia (ver anexo 1), este valor fue de 877.455 ejes equivalentes de 8.2 toneladas. Los resultados del diseño según el anexo 1 se resumen en la tabla 14.

**Tabla No. 14 Espesores de Capa**

<b>CAPA</b>	<b>ESPESOR Cms</b>
Carpeta asfáltica tipo MDC.2	10 cms
Espesor capa estabilizada	30 cms

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

En resumen la evaluación del material tomado en los 200m del tramo de prueba, se basó en dos muestras de suelo representativo tomadas en el K0+110 y la otra en el K0+190, en la programación de estudio se tuvo en cuenta:

- ✓ Auscultación de la vía
- ✓ Toma de muestras

- ✓ Caracterización física inicial del suelo
- ✓ Caracterización química del suelo
- ✓ Formulación química
- ✓ Estabilización química
- ✓ Análisis de tránsito
- ✓ Diseño del espesor de la capa

En la auscultación de la vía se paso la viga benkelman para determinar sitios críticos y se realizo la prueba de cono dinámico de suelos, para determinar la resistencia del suelo por efectos de corte cuando se somete a cargas.

El estudio defletoométrico no evidenció tramos críticos presentándose algunos valores de radio de curvatura menores de 80, los valores de PDC son variables un poco heterogéneos. Los valores de CBR están entre 18 y 39% bien sea por métodos directos o indirectos de cálculo, tratándose de un suelo de muy buenas propiedades mecánicas y con buena capacidad de soporte.

Para tener datos confiables se tomo un CBR inalterado y se probo en laboratorio dando como resultado un 18% de capacidad de soporte, siendo este un resultado bastante bueno; el resto de resultados fueron obtenidos por calculo indirecto de acuerdo a las deflexiones y los valores de PDC.

Las deflexiones características oscilan entre 30 y 42 mm/100, siendo la admisible de 95 mm/100. El modulo de resiliencia se encuentra entre 1200 a 1900 Kg/cm<sup>2</sup> siendo un valor normal entre 1500 a 2500 kg/cm<sup>2</sup> para un suelo fino tipo ML o CL.

El suelo se trata de un suelo tipo CL-ML (Suelo arcilloso-limoso de baja compresibilidad) con un índice de plasticidad de 8%, relativamente bajo.

De la caracterización química se puede decir que el PH del suelo es de 6.76, con un contenido de materia organica de 2,90% y con una capacidad de intercambio catiónico CIC de 21,69 meq/100.

Los resultados obtenidos en la variación de resistencia CBR con diferentes aditivos químicos, fueron variables con tiempos de curado de 7 y 14 días, mostraron que el ión calcio (cal viva) y con un CaO del 80%, empleando el producto en forma de polvo y adicionado al suelo en una concentración de 1.2% en peso seco del material natural de la vía y además adicionando el 0.2% de silicato de sodio se obtienen buenos resultados, ya que por interpolación y teniendo que al 1% de cal se obtiene un CBR de 42% y con un 1.5% se obtiene un CBR de 108%, el resultado final es que con un 1.2% de CaO y silicato de Na al 0.2%, se puede obtener un CBR entre 80 y 90%.

Finalmente y según el diseño de la estructura la capa estabilizada dio un valor de 33 cms, la cual se puede asumir con 30 cms, teniendo en cuenta el tipo de carga a solicitar y su frecuencia, adicionalmente el diseño tiene un factor de seguridad del 95% calculado con W18 con ejes equivalentes de 8.2 ton de 877.455, se anexa en el informe técnico inicial, la hoja de cálculo y diseño del pavimento.

## **12.2 RESULTADOS EVALUACIÓN FINAL DE SUBRASANTE ESTABILIZADA DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS**

Una vez terminado la estabilización del suelo, se procedió a una inspección de los trabajos y para observar las condiciones del terreno aditivado. Se presentan unas fisuras superficiales longitudinales en los hombros de la vía, las cuales son causadas por un efecto del calor de hidratación que se provoca por la misma

reacción entre los aditivos, el suelo y el agua que esta contenida en el, y que debido a la pérdida o disminución de esta, este suelo se contrae, sin traer perjuicios para la capa estabilizada, ya que se procedió a hidratar la superficie, y posteriormente se realizaron ensayos de viga benkelman en estas zonas de agrietamiento, los cuales no mostraron deficiencias en la superficie.

### 12.2.1 Viga Benkelman

Se paso la viga benkelman en todo el sector en una longitud de 200m del K0+070 al K0+270, y sobre la capa estabilizada, presentándose deflexiones muy aceptables sin detectarse sitios críticos que pudieran afectar la estructura estabilizada. No se tomaron en abscisas con espaciamiento definido, se optó por tomar las medidas en sitios donde se apreciara alguna condición superficial que generara duda como es el caso de los fisuramientos superficiales presentados en la capa estabilizada, y se tomó en los tres puntos de la calzada, (Izquierdo, eje y derecho); esto con el fin de tener más datos y tener una confiabilidad alta en la auscultación deflectométrica. Su propósito fundamental es determinar sitios críticos que requieran tratamiento adicional. Los resultados se presentan en la tabla No.15.

**Tabla No.15 Resultados Viga Benkelman**

<b>ABSCISA</b>	<b>D0 PROM.</b>	<b>DESV. STANDAR</b>	<b>Dc (1/100mm)</b>	<b>Dadm (1/100mm)</b>
K0+080	21.5	3.4	24.9	98
K0+130	20.9	3.3	24.2	98
K0+180	21.6	2.0	23.6	98
K0+190	22.5	4.1	26.6	98
K0+210	20.7	3.4	24.1	98
K0+230	21.7	2.3	24.1	98
K0+250	21.3	2.3	23.3	98
K0+260	22.1	1.4	23.5	98

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

En la tabla No.16 se presenta la comparación entre los valores de las deflexiones sufridas por la subrasante sin aditivar y la subrasante aditivada, se observa una disminución porcentual del 32% entre ambos resultados lo que nos indica la eficiencia en los trabajos realizados.

**Tabla No.16 Correlación Deflexiones características admisibles**

<b>ABSCISA</b>	<b>Dc (1/100mm) Sin aditivar</b>	<b>Dc (1/100mm) aditivado</b>	<b>Dadm (1/100mm)</b>
K0+070	41.8		98
K0+080		24.9	98
K0+110	35.1		98
K0+130		24.2	98
K0+150	35.3		98
K0+180		23.6	98
K0+190	35.9		98
K0+210		24.1	98
K0+230	32.3		98
K0+250		23.3	98
K0+260		23.5	98
K0+262	30.4		98
PROMEDIO	35.1	24.0	98

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**



La deflexión admisible fue calculada de acuerdo a la siguiente formula y de acuerdo al Instituto del asfalto:

$$DA=25.64*(N)^{-0.2383}$$

Donde N es el numero de ejes equivalentes a 8.2 toneladas (877.455)

El valor porcentual de disminución de la deflexión característica entre el suelo original y el aditivado es de 32%, lo cual indica que el modulo de rigidez es mayor y su deformación menor, en la tabla No.17, se presenta la comparación entre los módulos de resiliencia antes y después de estabilizar el suelo.

**Tabla No.17 Modulo de Resiliencia en suelo original y aditivado**

<b>ABSCISA</b>	<b>Modulo de Resiliencia suelo sin aditivar</b>	<b>Modulo Resiliencia suelo aditivado kg/cm2</b>
K0+070	1648	
K0+080		1897
K0+110	1427	
K0+130		1942
K0+150	1380	
K0+180		1886
K0+190	1294	1812
K0+210		1966
K0+230	1562	1875
K0+250		1908
K0+260	1823	1843

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

### **12.2.2 CBR Inalterados y calculados indirectamente con valores de PDC**

En este numeral se pretende mostrar las mejoras logradas en la capacidad de soporte del suelo, en la tabla No.18, se observa que hay un incremento porcentual en promedio del CBR del 46.2%

**Tabla No.18 CBR En suelo original y aditivado**

<b>ABSCISA</b>	<b>CBR ORIGINAL (%)</b>	<b>CBR ADITIVADO (14 días de curado) (%)</b>
K0+070	20.0	
K0+100		35.7
K0+130	24.0	
K0+150		43.1
K0+200		35.3
K0+220	35.0	
PROMEDIO	26.0	38.0

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Los CBR del suelo original son calculados de forma indirecta con los valores de PDC y de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CBR=292/(PDC)^{1.12}$$

Los CBR inalterados del suelo aditivado son correspondientes a los tomados en campo y su cálculo es directo, la edad de curado es de 14 días, usando una proyección se determinó el valor promedio del CBR de la capa de suelo estabilizada después de 28 días de curado, obteniendo un valor promedio de CBR de 103%, valor que supera el CBR de una capa de base de acuerdo con las especificaciones del INVIAS, artículo 300-07.

En la tabla No.19 se mostrarán los CBR del suelo a 14 días de la estabilización, y la proyección a los 28 días.

**Tabla No.19 CBR Aditivado 14 días y CBR Proyectado 28 días**

<b>ABSCISA</b>	<b>CBR ADITIVADO % 14 DIAS</b>	<b>CBR ADITIVADO PROYECTADO % 28 DIAS</b>
K0+100	35.7	97
K0+150	43.1	119
K0+200	35.3	94
PROMEDIO	38.0	103

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

Para la proyección del CBR aditivado se aplica la siguiente ecuación:

$$CBRp = K \cdot (CBR)^{1.14}$$

De donde:

CBRp = Proyectado a 28 días.

K = Constante para un suelo fino entre CL Y ML, y cuyo valor adoptado es de 1.63

CBR = Promedio de cada sector analizado o valor individual.

### 12.2.3 Límites de Atterberg

Se realizaron límites de atterberg de suelo original y aditivado, con los siguientes resultados, encontrando que el suelo estabilizado, tiene un valor de Índice de Plasticidad de 2.0%, valor que indica que el suelo cambia de clasificación de acuerdo con SUCS de un CL-ML, a un ML (limo de baja compresibilidad), mejorando sus condiciones y su capacidad de soporte. La tabla No.20, presenta la comparación entre los valores. Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de CORASFALTOS el 5 de octubre de 2009, con una muestra de suelo aditivado tomada por el Ingeniero Ricardo Patiño Solano.

**Tabla No.20 Limites de Atterberg**

<b>I.P.SUELO ORIGINAL</b>	<b>I.P. SUELO ADITIVADO</b>
8.0%	2.0%

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

#### 12.2.4 Densidades de campo

Se tomaron densidades de campo, mostradas en la tabla No.21, utilizando el método de cono de arena de acuerdo a la norma INVIAS, INV-E-161. “Ensayo de densidades en el campo con el método de arena”.

Los resultados y las fechas de estos ensayos se pueden ver en el anexo 2.

**Tabla No.21 Densidades de Campo**

<b>ABSCISA</b>	<b>CAPA No.</b>	<b>% COMPACTACION</b>	<b>%COMP. EXIG.</b>
K0+090	1	100	98
K0+109	1	102	98
K0+130	1	101	98
K0+150	1	100	98
K0+167	1	101	98
K0+140	1	99	98
K0+168	1	98	98
K0+190	1	97	98
K0+205	1	99	98
K0+235	1	101	98
K0+108	2	98	98
K0+146	2	98	98
K0+184	2	98	98
K0+222	2	102	98
K0+260	2	104	98

**Fuente: Estudios realizados por CORASFALTOS.**

El porcentaje de compactación exigido es de 98% del proctor modificado.

### **13. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ESTUDIOS INICIALES Y EVALUACIÓN FINAL**

Una vez analizados los estudios iniciales del suelo en el tramo de vía Camilo C – Fredonia k9+400, departamento de Antioquia, de proceder con su construcción y finalmente estudiados los resultados de la evaluación de la estructura estabilizada químicamente con la metodología de CORASFALTOS, se procedió a realizar los análisis de resultados en los cuales se tienen en cuenta si en realidad se cumplieron a cabalidad los objetivos específicos de esta evaluación técnica. En este análisis se hace una comparación de los datos arrojados entre la subrasante que existía del terraplén (estudio inicial) y la subrasante estabilizada (evaluación final), mostrando así el mejoramiento de esta y los datos proyectados, como también se analizan las ventajas y desventajas que se tienen al aplicar esta tecnología, tanto en fase de laboratorios como en la parte constructiva, los cuales se demostrarán a continuación.

Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio iniciales y finales de la subrasante, se procede a realizar un análisis comparativo de resultados, el cual mostrará los beneficios que se tuvieron después de 14 días de haber aplicado la capa estabilizada. Se debe contar con que el tiempo normal de curado y de reacción química del suelo estabilizado es de 28 días, tiempo en el cual se realiza la toma de datos final. En este tramo de vía se tomaron las muestras finales a los 14 días, ya que la interventoría tenía la programación de obra muy ajustada, y la carpeta asfáltica debía ser instalada 30 días después del inicio de obra.

### 13.1 DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA DEL SUELO ORIGINAL Y ADITIVADO

La deflexión característica del suelo aditivado presentó una disminución de un 32% con respecto a las obtenidas en el suelo original, mostradas en la tabla No.22. Esto indica que la deformación de la capa estabilizada es mínima dentro del rango permisible ( $\leq 98$  (1/100)), y por ende la asimilación de las cargas va a ser mucho mejor.

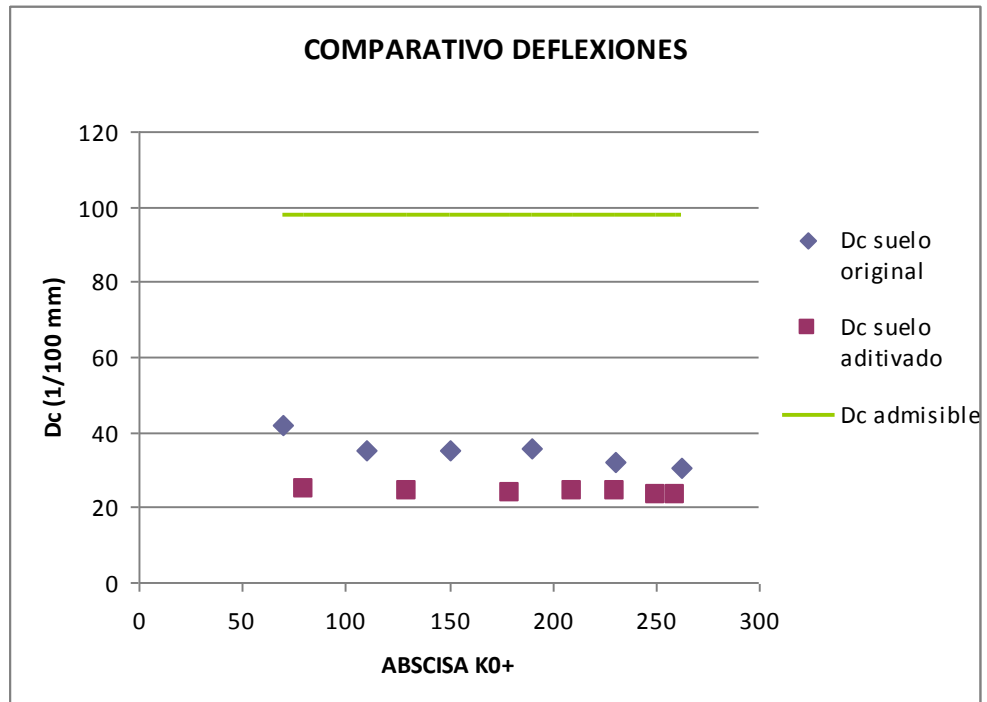
**Tabla No.22 Relación entre deflexiones características de suelo original y aditivado**

<b>ABSCISA</b>	<b>Dc (1/100) suelo original</b>	<b>Dc (1/100) suelo aditivado</b>
K0+070- K0+270	35.1	24.0

**Fuente: Realizado por los investigadores.**

En el gráfico No.22 se muestra el análisis comparativo de las deflexiones realizadas, y se observa la disminución de las deflexiones en el suelo aditivado comparado con el suelo original, indicando así que a los 14 días de curado muestra un resultado positivo en el aumento de la capacidad portante de la subrasante.

**Gráfica No.2 Comparativo de las deflexiones características del suelo**



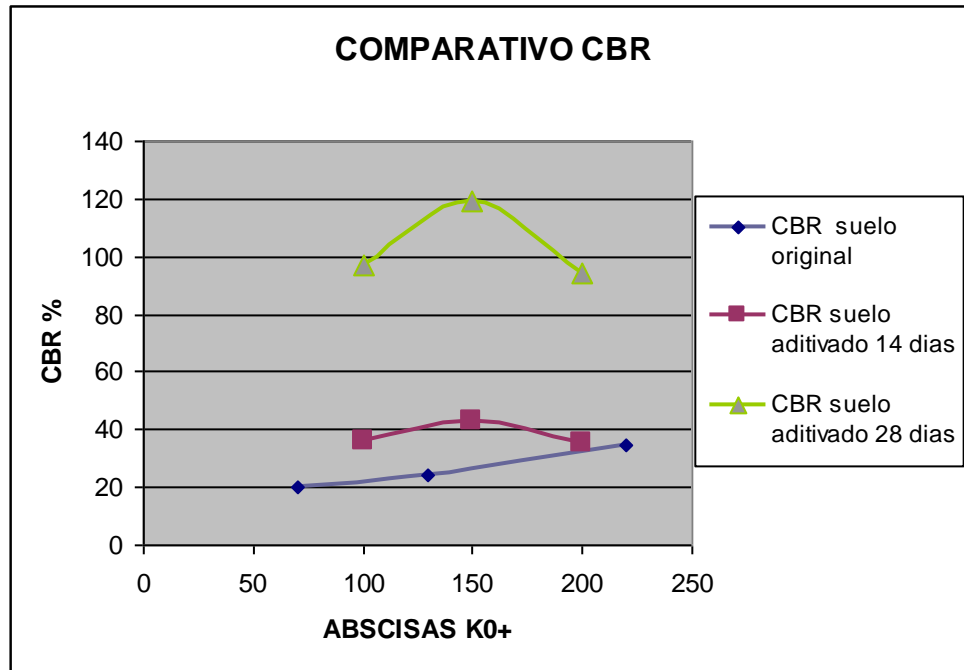
**Fuente: Realizado por los investigadores.**

### 13.2 CBR DEL SUELO ORIGINAL Y ADITIVADO

Se presenta un incremento de 48% con respecto al CBR original comparado con el CBR del suelo aditivado, ver tabla No.18 (CBR Aditivado a 14 días de curado); y con respecto al CBR calculado a 28 días, su porcentaje de incremento es de más del 100% (CBR indirecto de 103% promedio a 28 días), ver tabla No.19.

En la grafica No.3 se puede ver claramente como es la reacción del suelo estabilizado, indicando que entre más tiempo de curado mas alto es su valor de CBR.

**Gráfica No.3 Comparativo de CBR en suelo original y aditivado**



**Fuente: Realizado por los investigadores.**

En la noma INVIAS artículo 300-07, se dispone que las subbases deben tener CBR mayores o iguales a 30%, y las bases granulares CBR entre 80 y 100%, observando que para los resultados obtenidos en campo a los 14 días de curado el valor promedio de CBR de 38%, la subrasante tiene el comportamiento de una subbase granular, y para la proyección a los 28 días el suelo tendrá en promedio un comportamiento mecánico similar a una base granular, esto se evidencia en la tabla N.25, en donde se demuestra que con los CBR y módulos resilientes obtenidos después de estabilizar el suelo, se reemplazan las estructuras granulares de bases y subbases, recomendando allí una carpeta asfáltica MDC-2 de 10cms de espesor.



### **13.3 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DEL SUELO ORIGINAL Y ADITIVADO (LÍMITES DE ATTERBERG)**

El índice de plasticidad disminuiría del 8% al 1.1% según se muestra en los resultados de laboratorio de la evaluación inicial con un contenido de Oxido de cal de 1.5% y 1.0% de silicato de sodio, al ver los altos resultados de CBR que estos aditivos brindaron al suelo probado, se decidió interpolar las cantidades de aditivos, ajustándolas para que los futuros resultados de CBR se acercaran al 100%. Una vez hecho este análisis de resultados, y con autorización de CORASFALTOS, al suelo se le agregaron 1.3% de oxido de calcio y 0.2% de silicato de sodio, dando un índice de plasticidad final de 2.0 % (ver tabla No.20).

### **13.4 MÓDULOS RESILIENTES DE SUELO ORIGINAL Y ADITIVADO**

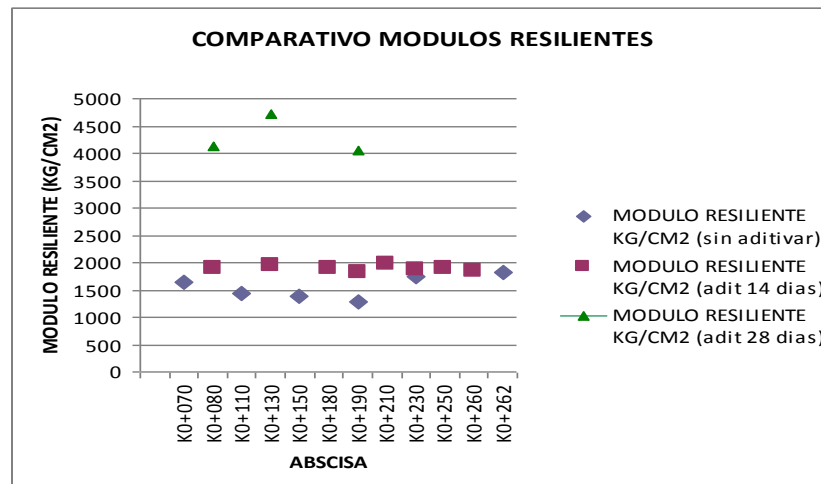
Tomando como base los resultados de PDC y CBR correlacionado del estado inicial del suelo, de los resultados de viga benkelman y CBR in situ de la evaluación final a los 14 días, se obtuvieron los módulos resilientes de cada tipo de suelo, indicando así que existe una mejora en la capacidad portante de este, elevando los módulos resilientes en un 21.7%. El modulo resiliente promedio proyectado aumenta en un 176% con respecto al inicial. Esto se puede observar en la tabla No.23 y en la gráfica No.4, en la cual se comparan los módulos resilientes.

**Tabla No.23 Módulos Resilientes del suelo Original y Aditivado**

ABSCISA	MODULO RESILIENTE KG/CM2 (Original)	MODULO RESILIENTE KG/CM2 (aditivado 14 días)	MODULO RESILIENTE KG/CM2 (aditivado 28 días)
K0+070	1648		
K0+080		1897	
K0+110	1427		4135
K0+130		1942	
K0+150	1380		4722
K0+180		1886	
K0+190	1294	1812	
K0+210		1966	4051
K0+230	1754	1875	
K0+250		1908	
K0+260		1843	
K0+262	1823		
PROMEDIO	1554	1891	4303

Fuente: Realizado por los investigadores.

**Gráfica No.4 Comparativo de los módulos resilientes**



Fuente: Realizado por los investigadores.

### 13.5 COMPARACIÓN DE DISEÑOS CON CBR INICIAL (SIN ESTABILIZAR) Y CBR FINAL (ADITIVADO)

En este numeral se demostrará como el suelo al ser estabilizado, reemplaza el material granular en el método tradicional, como lo son la base y la subbase, en vías secundarias y terciarias. Se verá el diseño de la estructura con el CBR del suelo en estado original, y este será comparado con el diseño de la estructura con el CBR del suelo al ser estabilizado.

**Tabla No.24 CBR de Diseño**

	SUELO ORIGINAL	SUELO ADITIVADO
CBR de Diseño (%)	22.5	95.5

**Fuente: Realizado por los investigadores.**

En la tabla No.24 se muestran los CBR de diseño, con los cuales se realizaron los diseños de la estructura.

**Tabla No.25 Diseño de la estructura con suelo original y aditivado**

ESPESOR (cm)	DISEÑO INICIAL SUELO ORIGINAL		DISEÑO FINAL SUELO ADITIVADO	
	TEÓRICO	PROPUESTO	TEÓRICO	PROPUESTO
CARPETA ASFALTICA	7.5	7.5	8.7	10.0
BASE	14.0	15.0	0.0	0.0
SUBBASE	25.4	25.0	0.0	0.0
TOTAL ESTRUCTURA		47.5		10.0

**Fuente: Realizado por los investigadores.**

Se puede observar en la tabla No.25 que usando el método de diseño de una estructura tradicional con capas de base y subbase de la AASHTO 93, con la capacidad portante del suelo sin estabilizar y estabilizado, no es necesaria la construcción de dichas capas, ya que al comparar los resultados de CBR con la

norma INVIAS artículo 300-07, se dispone que las subbases deben tener un CBR mayor o igual al 30%, y las bases granulares un CBR entre el 80 y 100%. Esto significa que para los resultados obtenidos en campo a los 14 días de curado el valor promedio de CBR fue de 38%, es decir que la subrasante tiene el comportamiento de una subbase granular, y que para la proyección a los 28 días el suelo tendrá un comportamiento mecánico similar a una base granular.

En el anexo 4 se puede ver el diseño completo de estas estructuras.

### **13.6 ANÁLISIS DE MÉTODO CONSTRUCTIVO – PRESUPUESTOS – RENDIMIENTOS DE MAQUINARIA Y MANO DE OBRA**

Una vez analizados y comparados los estudios iniciales y de evaluación final, se pueden demostrar los beneficios técnicos que conlleva el aplicar esta tecnología, los cuales por sus resultados finales de CBR y de densidades de compactación tomadas en campo, se asemejan a los resultados de Subbase y en muchos casos de base granular, por lo que se puede decir que este tipo de aplicaciones pueden reemplazar estas estructuras granulares, que en algunos casos generan sobre costos y dificultades de transporte en zonas de difícil acceso. Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a analizar la estructura de costos directos presupuestados frente a los ejecutados, así mismo los análisis de rendimientos de maquinaria y mano de obra, como también los precios de los aditivos utilizados.

Los datos que se muestran en la tabla No.26 hacen parte de la información tomada directamente en obra.

**Tabla No. 26 Análisis de rendimiento de maquinaria y mano de obra**

ANALISIS DE RENDIMIENTO DE MAQUINARIA Y MANO DE OBRA					
TIEMPO DE EJEC.		19 DIAS			
HORAS TOTALES LAB		189			
	HORAS UTILI.	M3 TOTALES	RENDIM. m3/h	COSTO	SUBTOTAL
PAJARITA	42	540	12,85714286	\$ 60.000	\$ 2.520.000
MOTONIVELADORA	105	540	5,142857143	\$ 90.000	\$ 9.450.000
VIBROCOMPACTADOR	42	540	12,85714286	\$ 75.000	\$ 3.150.000
TRACTOR AGRICOLA	24	540	22,5	\$ 45.000	\$ 1.080.000
			TOTAL MAQUINARIA		\$ 16.200.000
			M3 EJECUTADOS		540
			COSTO DE MAQUIN/ M3		\$ 30.000
MANO DE OBRA	Hs- HOMBRE	M3 TOTALES	RENDIM. m3/h	COSTO Hr.	TOTAL
TOPOGRAFIA Y AYUD	40	540	13,5	\$ 37.500	\$ 1.500.000
4 AYUDANTES	760	540	0,710526316	\$ 2.763	\$ 2.100.000
			TOTAL M. OBRA		\$ 3.600.000
			M3 EJECUTADOS		540
			COSTO DE MO/ M3		\$ 6.667
ADITIVOS	CANT. TON	M3 TOTALES	RENDIM. m3/ton	COSTO Hr.	TOTAL
CAL VIVA AL 80%	17	540	31,76470588	\$ 380.000	\$ 6.460.000
SILICATO DE SODIO AL 42%	3	540	180	\$ 700.000	\$ 2.100.000
			TOTAL M. OBRA		\$ 8.560.000
			M3 EJECUTADOS		540
			COSTO DE ADIT/ M3		\$ 15.852
ANALISIS DE COSTOS PRESUPUESTADOS Y EJECUTADOS					
	COSTOS DIR	M3 TOTALES	TOTAL COST DIR		
TOTAL M3 PRESUPUESTADO	\$ 61.671,7	540	\$ 33.302.740		
TOTAL M3 EJECUTADO	\$ 52.518,5	540	\$ 28.360.000		
	UTILIDAD EN COSTOS DIRECTOS		\$ 4.942.740		

**Fuente: Realizado por los investigadores.**

Cabe anotar que el tiempo de ejecución de obra fue más de lo estimado y que los rendimientos aquí mostrados son relativamente bajos para la cantidad de metros cúbicos ejecutados. Normalmente un kilómetro de vía estabilizada de siete metros de ancho se tarda aproximadamente y sin tener contratiempos, 15 días; la ejecución de la estabilización química de suelos de CORASFALTOS, en el tramo de vía CAMILO C. – FREDONIA, SECTOR EL TESORO, se tomó 21 días, esto debido a que regularmente la estabilización se trabaja en monocapa de 30cm de espesor. En el caso de este tramo de vía se tuvieron problemas de logística en cuanto a la maquinaria a utilizar, ya que no era la apropiada para trabajar estos espesores, por ello la empresa constructora tomo la decisión de ejecutar el proyecto de 200 ml en dos capas de 15cm, y no incurrir en los sobrecostos que se generaban al alquilar y transportar esta maquinaria, lo que generó que el tiempo estimado de construcción inicial que se tenía previsto se duplicara.

Se puede analizar en la tabla No.26 que la estructura de costos presupuestada (ver anexo 3) esta bien planteada, ya que los resultados de rendimientos para este tramo de 200 ml son relativamente bajos teniendo como base los que genera la construcción de un kilómetro de vía con esta metodología, es decir, que los costos directos de ejecución muestran un comportamiento positivo teniendo en cuenta el bajo rendimiento que se tuvo, lo que significa que los costos tienen una holgura considerable, de la cual se puede beneficiar el constructor al momento de competir, esto sin tener en cuenta el ahorro del 34,15% con respecto a la estructura de bases y subbases que el contratista Gisaico S.A. tenía cotizada, el cual esta representado en el anexo 3.

Es por estos motivos que resulta conveniente aplicar esta metodología en la construcción de vías secundarias y terciarias, ya que esta puede llegar a reemplazar o complementar las estructuras granulares, reducir costos en materiales y sus transportes.

### 13.7 IMPACTOS QUE TIENE LA APLICACIÓN DE ESTA TECNOLOGÍA

A continuación se mostraran los impactos ambientales, sociales y económicos que conlleva esta tecnología.

#### 13.7.1 Impacto Ambiental

- ✓ Elimina fuente de contaminación al medio ambiente por polvo del suelo sin pavimentar
- ✓ Impacto ambiental mínimo por reducción aproximada del 98% en transporte de material aplicando esta tecnología.
- ✓ Ahorro del consumo de materiales pétreos y gravas, como estabilizadores o capas estructurales, en defensa del medio ambiente; porque la utilización del sub suelo se convierte en estructura del pavimento.
- ✓ Cero explotación en ríos y canteras, para adquisición de materiales pétreos, Aproximado por kilometro 2450m<sup>3</sup> (ver tabla No.27).

**Tabla No.27 Análisis Ambiental del transporte de material**

ANALISIS AMBIENTAL - TRANSPORTE DE MATERIAL			
	ADITIVOS (Ton/Km)	DENSIDAD (Ton/m3)	TOTAL M3
ESTABILIZACION	50	1,7	29,41
	M3/ KM	M3 / VOLQ	# VIAJES
BASES Y SUBBASES	2450	7	350
ESTABILIZACION	29,41	7	4,20
	REDUCCION EN TRANSPORTE		98,80%

Fuente: Realizado por los investigadores.

### **13.7.2 Impacto Social**

- ✓ Amplios beneficios a los municipios de Camilo C. y Fredonia, como también, las veredas la bonita, el tesoro, y la paloma, ya que esta metodología esta creada para vías secundarias y terciarias.
- ✓ Interés del gobierno por construir sus vías a bajo costo.
- ✓ Rápida construcción, lo cual permite que la intervención no sea mas larga de lo esperado.
- ✓ La aplicación de estas metodologías dan apertura a nuevas economías, bajan el costo de vida, y brindan seguridad a la movilidad del país.

### **13.7.3 Impacto Económico**

- ✓ Ahorro significativo en construcción por km de vía. En el tramo de 200 ml y teniendo en cuenta que los rendimientos fueron bajos, se pudo demostrar que el ahorro fue significativo, en un 34,15% menos que el sistema tradicional. (ver tabla No.28)
- ✓ Opción eficiente y económica para el mejoramiento de vías, y de subrasante.
- ✓ Las estabilizaciones físico-químicas y mecánicas, son larga vida, lo cual permiten que el cuidado y mantenimiento de estas sean a costos muy bajos, los cuales brindan seguridad y viabilidad financiera al proyecto, como también a la administración pública y privada.
- ✓ Rápida ejecución de las obras, un 40 % aproximado de ahorro en tiempo.
- ✓ Facilidad de contratación pública, esta se hace directamente ya que la ley 80 indica esto para actividades de ciencia y tecnología, lo que hace que el proceso y los trámites de contratación se reduzcan en un 90%.



- ✓ Respaldada por entes gubernamentales como: ministerio de vías y transporte, Colciencias, Invías, Ecopetrol, Sena.

**Tabla No.28 Comparativo de Presupuestos del método tradicional con la metodología**

<b>CUADRO COMPARATIVO DE PRESUPUESTOS</b>	
<b>OPQ - CORASFALTOS Vs. GISAICO</b>	
COMPARACION TOTAL DIRECTOS + INDIRECTOS + ESTUDIOS + INTERVENTORIA	
METODOLOGIA CORASFALTOS	49.898.152
METODOLOGIA TRADICIONAL	75.778.380
DIFERENCIA PORCENTUAL	34,15%

**Fuente: Realizado por los investigadores.**

## 14. CONCLUSIONES

Durante este proyecto se evaluaron los beneficios técnicos y constructivos de la metodología desarrollada por CORASFALTOS, como alternativa para el mejoramiento de la estructura de pavimento en el tramo Camilo C. – Fredonia, sector el Tesoro, Departamento de Antioquia.

Este proyecto se desarrollo en una capa de subrasante compuesta por suelos CL-ML, los cuales tenían un índice de plasticidad del 8%, límite líquido de 26, límite plástico de 18, una densidad seca máxima de  $1.862\text{g/cm}^3$ , una humedad de compactación de 12.9% y una capacidad de soporte CBR de 26%. Este suelo fue estudiado y de acuerdo con la tecnología de CORASFALTOS, se determinó que el contenido óptimo de estabilización fue aplicar 1,3 % de oxido de cal y 0,2% de silicato de sodio.

Los principales beneficios técnicos determinados en el proyecto fueron:

- ✓ Incremento en la capacidad de soporte del suelo de acuerdo con el ensayo de CBR en un valor promedio de 26 (suelo sin estabilizar) hasta un valor promedio de 38 (suelo estabilizado a los 14 días de curado).
- ✓ El estudio deflectométrico realizado con el ensayo de viga benkelman del tramo piloto, supera las expectativas, ya que se logró que los radios de curvatura del suelo estabilizado, estuvieran por debajo del rango permisible de 80, las deflexiones no reflejan sitios críticos, es mas, se observa que las deformaciones son mínimas ante la sollicitación de cargas dinámicas. Todas las deformaciones se encontraron por debajo de 30/100mm, cuando el valor de la deformación admisible es 98/100mm.

- ✓ Después de la ejecución de los trabajos, se logró disminuir el índice de plasticidad desde un valor de 8% hasta un valor de 2%, parámetro que se refleja en el incremento de la capacidad de soporte del suelo.
- ✓ Los porcentajes de compactación de la capa estabilizada cumplen con lo exigido  $\geq 98\%$ . Informe de ensayos de Gisaico.

Los principales beneficios constructivos determinados en el proyecto fueron:

- ✓ Ahorro del consumo de materiales pétreos y gravas, como estabilizadores o capas estructurales, en defensa del medio ambiente; ya que la utilización del subsuelo se convierte en estructura del pavimento. Cero explotación en ríos y canteras para la adquisición de materiales pétreos, aproximadamente  $2450\text{m}^3$  por kilómetro.
- ✓ Ahorro en el tiempo de construcción, pues se eliminan las actividades de transporte, extensión, nivelación y compactación de las capas de base y subbase.
- ✓ Ahorro en la cantidad de aditivos químicos agregados al suelo, frente a las tecnologías tradicionales de estabilización de este.

Se identificó que aunque la tecnología constituye un análisis detallado de los suelos que implica mayor inversión y costos antes de iniciar el proyecto de aproximadamente \$22.000.000, dicha inversión es recuperada durante el proceso constructivo, en donde se tiene un ahorro en tiempo de un 20% y un ahorro económico de 34% frente a los métodos tradicionales.

A través del diseño de una estructura tradicional de bases y subbases, con la capacidad portante del suelo sin estabilizar y estabilizado, usando el método de la AASHTO 93, se observó que después de la aplicación de este método no es necesaria la construcción de las capas de base y de subbase. Además al comparar los resultados de CBR con la norma INVIAS artículo 300-07, se dispone que las subbases deben tener un CBR mayor o igual a un 30%, y las bases granulares un CBR entre el 80 y 100%. Se puede ver que para los resultados obtenidos en campo a los 14 días de curado el valor promedio de CBR fue de 38%, es decir que la subrasante tiene el comportamiento de una subbase granular y que para la proyección a los 28 días el suelo tendrá en un comportamiento mecánico similar a una base granular.

Se evaluaron costos, tiempo y rendimientos de ejecución realizando un análisis comparativo con los métodos tradicionales, y se pudo verificar que existe un ahorro significativo en estos parámetros.

## **15. RECOMENDACIONES**

- ✓ Se recomienda construir obras de drenaje en el tramo, como cunetas en concreto o sardineles de confinamiento, filtros de ladera, empradizar los taludes del terraplén e imprimir las bermas.

## 16. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ MERRIT, F. Manual del ingeniero civil, Vol. 1, editorial MC GRAW HILL, 2000.
- ✓ MERRIT, Frederick. Enciclopedia de la construcción, Vol. 1, editorial OCEANO CENTRUM.
- ✓ LERMA, G. H. D. Metodología de la Investigación, Editorial.
- ✓ GOBERNACION DE ANTIOQUIA, plan vial sub regional participativo, subregión del suroeste Antioqueño. Año.
  
- ✓ [www.botanical-online.com/tiposdesuelo.htm](http://www.botanical-online.com/tiposdesuelo.htm)
- ✓ [www.ingenieracivil.blogspot.com](http://www.ingenieracivil.blogspot.com)
- ✓ [www.ingenieracivil.blogspot.com/2007/05/determinacin-del-cbr.html](http://www.ingenieracivil.blogspot.com/2007/05/determinacin-del-cbr.html).
- ✓ [www.utpl.edu.ec/ucg/images/stories/Investigaciones/zu%F1iga\\_anchundia.pdf](http://www.utpl.edu.ec/ucg/images/stories/Investigaciones/zu%F1iga_anchundia.pdf)
- ✓ [www.citopib.com/archivos/marga/TratCal\\_ANCADE.pdf](http://www.citopib.com/archivos/marga/TratCal_ANCADE.pdf)
- ✓ [www.umng.edu.co/www/resources/16-2\\_4.pdf](http://www.umng.edu.co/www/resources/16-2_4.pdf)
- ✓ [www.udec.cl/~provial/trabajos\\_pdf/15ThenouxCenizasPetropower.pdf](http://www.udec.cl/~provial/trabajos_pdf/15ThenouxCenizasPetropower.pdf)

# **ANEXO 1**

INFORME TÉCNICO INICIAL (SUELO ORIGINAL)

# **ANEXO 2**

INFORME TÉCNICO FINAL (SUELO ADITIVADO)



# **ANEXO 3**

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS - PRESUPUESTOS –  
ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS – CRONOGRAMA  
DE CONSTRUCCIÓN**

PRESUPUESTO METODOLOGIA TECNOLOGICA CORASFALTOS - TRAMO FREDONIA					
CONSTRUCCIÓN DE VÍA FREDONIA – CAMILO C, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA APLICANDO ESTABILIZACION QUIMICA DE SUELOS TECNOLOGIA CORASFALTOS, EN UNA LONGITUD DE 200 ML X 9M DE ANCHO - CORONA Y UN ESPESOR DE 0.30M (NO INCLUYE OBRAS DE DRENAJE Y SUBDRENAJE)					
No.	DESCRIPCION	UND	CANT.	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
0	ESTUDIOS Y DISEÑOS				
0	ESTUDIO + DISEÑO - CORASFALTOS	GL	1.00	10,000,000	10,000,000
		SUB TOTAL			10,000,000
	IVA 16%	%	16%		1,600,000
	TOTAL ESTUDIOS				11,600,000
NOTA: LOS DISEÑOS NO TIENEN AIU PERO SE COBRARA EL IVA SOBRE SU TOTAL					
CONSTRUCCION ESTRUCTURA PAVIMENTO					
1	ESTRUCTURA PAVIMENTO				
1.1	ESTABILIZACION QUIMICA DE SUELOS e=0.3 M + SEGUIMIENTO APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA	M3	540.00	70,923	38,298,152
	INCLUYE				
	topografía y revisión geométrica				
	Escarificación y compactación de subrasante				
	Aditivos químicos - sólidos y líquidos				
	compactación y conformación de estabilización				
	Nivelación y compactación de rasante para imprim y carp. asfáltica				
		TOTAL 1			38,298,152
	TOTAL COSTOS (valor unitario incluye aiu 15%)				38,298,152
	TOTAL CONSTRUCCION + ESTUDIOS Y DISEÑOS+ INT. TECNIC				49,898,152

GISAICO S.A. Contrato No. 2008-CO-20-360 vía Camilo C. - Fredonia					
CONSTRUCCIÓN DE VÍA FREDONIA – CAMILO C, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA APLICANDO ESTABILIZACION QUIMICA DE SUELOS TECNOLOGIA CORASFALTOS, EN UNA LONGITUD DE 200 ML X 9M DE ANCHO - CORONA Y UN ESPESOR DE 0.30M (NO INCLUYE OBRAS DE DRENAJE Y SUBDRENAJE)					
CONSTRUCCION ESTRUCTURA PAVIMENTO					
	CAPITULO III				
3	CONFORMACION ESTRUCTURA BASES Y SUB BASES				
3.1	MEJORAMIENTO Y COMPACTACION DE SUB RASANTE AL 95% P.M.	M2	1800	\$ 4,390	7,902,000
3.2	SUB BASE GRANULAR TIPO INVIAS	M3	0.0	\$ 0	0
3.3	BASE GRANULAR TIPO INVIAS	M3	540	\$ 75,647	40,849,380
3.4	TRANSPORTE BASE GRANULAR	M3-KM	18,900	\$ 1,430	27,027,000
		SUBTOTAL			75,778,380
	TOTAL COSTOS (valor unitario incluye AIU 30%)				75,778,380

OPQ INGENIEROS LTDA.	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS
<b>TRAMO: TERRAPLEN VIA CAMILOC - FREDONIA</b> <b>ITEM: ESTABILIZACION QUIMICA TECNOLOGIA CORASFALTOS E=0.30</b>	
UNIDAD : M3	

#### I. EQUIPO

Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Valor-Unit.	
HERRAMIENTA MENOR				734,81	
MOTONIVELADORA		120.439,00	20,00	6.021,95	
RECICLADORA-ESTABILIZADORA		250.000	20,00	12.500,00	
TANQUE AGUA		59.000	18,00	3.277,78	
CILINDRO COMPACTADOR 15 ton		90.000	20,00	4.500,00	
Sub-Total					27.034,54

#### II. MATERIALES EN OBRA

Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Valor-Unit.	
ADITIVOS QUIMICOS SOLIDOS	TON	1.150.000	0,015	17.250,00	
ADITIVOS QUIMICOS LIQUIDOS	TON	1.150.000	0,002	2.300,00	
DESPERDICIO (2%)				391,00	
Sub-Total					19.941,00

#### III. TRANSPORTES

Material	Vol. Peso ó Cant.	Distancia	M3-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
					0,00	
Sub-Total						0,00

#### IV. MANO DE OBRA

Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.	
CUADRILLA F	\$ 175.850,00	185%	325.322,50	55,00	5.914,95	
TOPOGRAFIA Y REVISION GEO	\$ 250.000,00	185%	462.500,00	80,00	5.781,25	
ensayos de laboratorio de campo durante ejecucion de obra-CORASFALTOS			3000	1	3.000,00	
Sub-Total						14.696,20

Total Costo Directo

61.671,74

AIU	15%	9250,76
COSTO TOTAL		70.922,50

# **ANEXO 4**

**DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS CON CBR DE SUELO  
ORIGINAL Y ADITIVADO**

# **ANEXO 5**

NORMATIVIDAD

## **NORMATIVIDAD**

### **1. ESPECIFICACIONES INVIAS**

- ✓ Determinación en el laboratorio del contenido de agua y humedad INV E-122
- ✓ Granulometría por tamizado INV E-123
- ✓ Granulometría por hidrómetro INV E-124
- ✓ Límite líquido. INV E-125
- ✓ Límite plástico e índice de plasticidad INV E-126
- ✓ Determinación del peso específico INV E-128
- ✓ Equivalente de arena de suelos. INV E-133
- ✓ Relaciones peso unitario-humedad INV E-142
- ✓ Compresión simple o inconfiada. INV E-152
- ✓ Ensayo de CBR (California Bearing Ratio). INV E-148
- ✓ Permeabilidad de suelos. INV E-130
- ✓ Consolidación unidimensional de suelos. INV E-151

### **2. ESPECIFICACIONES AASHTO (American Association of state Highway and Transportation officials)**

# **ANEXO 6**

FOTOGRAFÍAS





**Nivelación y Escarificación**



**Distribución de aditivos químicos**



**Mezcla de aditivos**



**Chequeo de niveles**



**Compactación**



**Estudiantes de Ingeniería Civil: Pablo Prada y Ximena López**



**Estado final del suelo estabilizado**



**Estado final de la vía**